

Schneider P. *The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications*. – Cambridge University Press, 2003. – 505 p. 32. Baral C. *Knowledge Representation, Reasoning and Declarative Problem Solving*. – Cambridge University Press, 2003. – 544 p. 33. Davies J., Fensel D., Harmelen F. *On-To-Knowledge: Content-Driven Knowledge-Management through Evolving Ontologies*. – John Wiley & Sons, 2002. – 312 p. 34. Sowa J. *Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations*. – Blackwell, 1999. – 608 p. 35. Chater N., Oaksford M. *The probabilistic mind: Prospects for Bayesian cognitive science*. – Oxford University Press, 2008. – 534 p. 36. Tanwar P., Prasad T., Datta K. *Hybrid technique for effective knowledge representation and a comparative study*. – [Електронний ресурс]: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1209/1209.3869.pdf>. 37. Huyck C. *Knowledge Representation, Semantic Nets, Frames, Scripts*. – [Електронний ресурс]: <http://www.cwa.mdx.ac.uk/bis2040/JohnLects/01bkb05p.ppt>. 38. Bush V. *As We May Think*. – *Atlantic Monthly*, 1945. – 10 p. 39. Davies S., Allen S., Raphaelson J., Meng E., Engleman J., King R., Lewis C. *Popcorn: the personal knowledge base / Proceedings of the 6th conference on Designing Interactive systems*. – ACM, 2006. – 150–159 p. 40. Munn K., Smith J. *Applied Ontology: An Introduction*. – Ontos Verlag, 2009. – 342 p.

УДК 004.3; 004.7

В. Голембо, О. Бочкарьов

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних обчислювальних машин

ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ КОНЦЕПТУАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

© Голембо В., Бочкарьов О., 2017

Розглянуто підходи до побудови концептуальних моделей кіберфізичних систем (КФС). Запропоновано узагальнену схему взаємодії КФС з оточенням та визначено набір основних компонент КФС. Розглянуто організацію функціонування компонент КФС та запропоновано відповідну концептуальну модель. Визначено поняття контуру взаємодії КФС з фізичними процесами та запропоновано концептуальну модель контурів взаємодії. Розглянуто проблему узгодження взаємодії КФС з фізичними процесами. Запропоновано концептуальну модель інтегрування компонент КФС.

Ключові слова: кіберфізична система, концептуальна модель.

Approaches to the construction of conceptual models of cyber-physical systems are considered. A generalized scheme of interaction between the CPS and its environment is proposed. The set of basic CPS components is defined. The organization of CPS components functioning is considered. The corresponding conceptual model is proposed. The definition of the contour of interaction between CPS and physical processes is provided. The conceptual model of the contours of interaction is proposed. The problem of matching CPS interaction with the physical processes is considered. The conceptual model of integration of CPS components is proposed.

Key words: cyber-physical system, conceptual model.

Вступ

Під кіберфізичною системою (КФС) розуміють систему, яка складається з деякої зв'язної множини кібернетичних засобів (управління, обробки, передавання даних та ін.), та взаємодіє з фізичним середовищем за допомогою сенсорних і виконавчих систем за схемою зворотного зв'язку

[1–3]. Також із загальніших позицій КФС поєднує кібернетичні засоби та фізичні системи (електромеханічні, хімічні, інженерно-технічні, біологічні та ін.) [2]. Ідея, покладена в основу концепції КФС, полягає у спробі кардинально розширити можливості людини щодо взаємодії з фізичними процесами навколишнього світу за посередництвом все досконаліших, більш автономних та більш “розумних” кібернетичних засобів.

Масштаби проектування, розроблення та застосування КФС сьогодні швидко зростають. Вирішальним чинником, який зумовлює цей процес, є розвиток обчислювальних та комунікаційних можливостей сучасних обчислювальних засобів, зокрема перехід до моделей мобільних обчислень, в яких окремі компоненти КФС можуть переміщуватись у фізичному просторі. Також важливим напрямком розвитку КФС є збільшення їх автономності внаслідок передавання їм суттєвої частини повноважень у прийнятті рішень як у сфері практичних задач, які вирішують ці КФС, так і в області оптимізації та забезпечення надійності роботи самих КФС. Для розв’язання цих задач широко застосовують методи штучного інтелекту (зокрема методи машинного навчання), технології багатоагентних систем, принципи адаптації та самоорганізації. Своєю чергою, це призводить до ускладнення структур та принципів роботи КФС, що разом з великою кількістю різнорідних підходів до створення різних компонент та підсистем КФС різко ускладнює дослідження, проектування та розроблення КФС. Тому особливо актуальними є спроби розробити універсальні підходи до вирішення проблематики КФС, зокрема на основі моделювання їх структур та принципів роботи.

Розглянуто підходи до побудови концептуальних моделей кіберфізичних систем з метою: 1) дослідити принципи побудови та роботи КФС; 2) описати їх базову функціональність; 3) сформулювати оптимізаційні задачі у сфері створення та функціонування КФС на достатньо високому рівні абстрагування від низкорівневих деталей їхньої роботи; 4) створити основу для розроблення математичних моделей КФС; 5) окреслити способи інтегрування компонент КФС.

В основу роботи покладено доповідь [4] на Другому науковому семінарі “Кіберфізичні системи: досягнення та виклики” (Національний університет “Львівська політехніка”, 21–22 червня, 2016).

Стан проблеми

Сучасний розвиток загальної концепції КФС підкріплюється вагомими практичними результатами у розробленні КФС широкого спектра призначення [1]. У межах загального підходу продовжують виникати нові наукові школи та напрями. Дослідження та проектування КФС охоплює все більший діапазон фізичних систем та явищ у різних просторових та часових масштабах. У сферах дослідження та розроблення КФС обговорюють таку перспективу: так само, як Інтернет змінив спосіб взаємодії людей, так і КФС змінить спосіб взаємодії людей з навколишнім фізичним світом.

Концепція КФС тісно пов’язана з такими концепціями і галузями обчислювальної техніки та інформаційних технологій: вбудовані комп’ютерні системи (embedded systems), Інтернет речей (Internet of Things), безпроводні сенсорні мережі (wireless sensor networks), всюдиприсутні обчислення (ubiquitous computing), навколишній штучний інтелект (ambient intelligence), мобільні обчислення (mobile computing), контекстно-залежні обчислення (context-aware computing), однорангові обчислення (edge computing) та ін. Всі ці концепції і галузі поєднані з концепцією КФС спільною метою: знайти та реалізувати нові закони управління кібернетичними засобами та їх взаємодією з оточенням у такий спосіб, щоб забезпечити розв’язання все складніших задач, витрачаючи на це все менше ресурсів. Нагадаємо, що згідно з класичним визначенням Норберта Вінера, кібернетика – це наука про загальні закони управління та зв’язку в тварині та в машині [5, 6].

Однею з основних проблем у галузі дослідження та розроблення КФС є велика різнорідність відповідних кібернетичних засобів, яка додатково накладається на великий спектр систем та процесів різної фізичної природи, для управління якими створюються КФС. До того ж існує проблема різних підходів до дослідження, створення, тестування та експлуатації різнорідних компонент КФС. Не існує єдиної “мови” створення КФС, яка б інкапсулювала відмінності у підходах до розроблення компонент КФС на її різних рівнях. Отже, завдання розроблення та

впровадження уніфікованих гнучких рішень у сфері розроблення КФС залишається складним завданням. З огляду на це дослідницькі зусилля, спрямовані на пошук універсальних законів та принципів побудови і функціонування КФС, є особливо актуальними.

Аналіз наукових та практичних результатів в цьому напрямку показує три основні тенденції у спробах запропонувати уніфікований підхід до побудови КФС. За першою тенденцією, враховуючи концепцію багаторівневих систем, будують різні варіанти ієрархічних структур КФС, в яких кожний наступний рівень абстрагування приховує деталі роботи нижніх рівнів. Зокрема в [7] запропоновано п'ять рівнів КФС: 1) рівень мережного зв'язку та збирання інформації (Smart Connection Level), 2) рівень обробки інформації (Data-to-Information Conversion Level), 3) рівень моделювання та прогнозування (Cyber Level), 4) рівень прийняття рішень (Cognition Level), 5) рівень самоконфігурації та самооптимізації (Configurations Level). Інший підхід у межах першої тенденції виділяє три типи рівнів у КФС [8]: 1) рівень взаємодії з середовищем (Environmental Tiers); 2) рівень обчислювальної інфраструктури (Service Tiers); 3) рівень прийняття управлінських рішень (Control Tiers).

За другою тенденцією увага концентрується на різних типах кібернетичних засобів та пропонуються різні варіанти їх класифікації, уніфікації та стратифікації за рівнями КФС [8,9]. Наприклад, у архітектурі КФС, основаної на модулях (Module-Based Architecture for CPS) [8], виділено шість уніфікованих модулів КФС: 1) модуль сприйняття (Sensing Module); 2) модуль управління даними (Data Management Module); 3) мережний модуль (Next-Generation Internet); 4) сервісні модулі (Service Aware Modules); 5) модуль прикладних програм (Application Module); 6) модуль сенсорних та виконавчих систем (Sensors and Actuators).

За третьою тенденцією як основу для уніфікації використано поняття сервісу, навколо якого за тим чи іншим принципом вибудовується багаторівнева структура КФС. Наприклад, у архітектурі КФС, основаної на сервісах (Service-Based architecture for CPS) [8], два основні типи сервісів: 1) сервіс управління набором пристроїв (Device bundle) та 2) сервісні агенти (Agent service) розміщені на 2-му рівні трирівневої структури КФС: а) фізичний рівень (Physical tier); б) сервісний рівень (Service tier); в) прикладний рівень (Application tier). В іншому прикладі – в сервіс-орієнтованій архітектурі КФС (Service-Oriented Architecture of CPS) [8] структуру КФС поділено на чотири рівні: 1) рівень реалізації сервісів (Service implementation layer); 2) рівень організації доступу та виклику сервісів (Service abstraction layer); 3) рівень управління сервісами (Business process layer); 4) рівень прикладних програм (Application layer).

Велику роботу з пошуку універсальних законів та принципів побудови і функціонування КФС виконують у межах робіт з математичного моделювання КФС [2, 10–12]. Дослідженню та моделюванню проблем синхронізації різнорідних компонент КФС та узгодженню їх роботи у часі присвячено роботу [13].

Основні компоненти КФС та її взаємодія з оточенням

Взаємодія КФС з оточенням (рис.1) відбувається одночасно у двох просторах: 1) кібернетичному (кіберпростір), під яким розуміють штучні кібернетичні засоби у всій їх сукупності та розмаїтті і 2) фізичному просторі (середовищі), в якому знаходяться фізичні об'єкти та відбуваються відповідні фізичні процеси їх взаємодії. На вхід КФС надходять 1) вхідні дані d_x з множини всіх можливих варіантів вхідних даних D_x та команди c_x з множини команд C_x ; 2) поточний стан фізичних процесів s_p з множини станів S_p . На виході КФС ми отримуємо 1) вихідні дані d_y з множини всіх можливих варіантів вихідних даних D_y ; 2) керівні впливи a_p з множини керівних впливів A_p . Отже, взаємодію КФС з її оточенням можна подати як кортеж $\langle D_x, C_x, D_y, S_p, A_p, T_d, T_p \rangle$, де $T_p: (D_x, C_x) \times S_p \rightarrow D_y$ – оператор, який відображає вхідні дані, команди та стани фізичних процесів у вихідні дані, а $T_d: (D_x, C_x) \times S_p \rightarrow A_p$ – оператор, який відображає вхідні дані, команди та стани фізичних процесів у керівні впливи. Вигляд операторів (T_d, T_p) задається структурою та параметрами КФС, які, своєю чергою, обираються так, щоб максимізувати задану цільову функцію КФС:

$$u = F_{CPS}(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (1)$$

де x_1, x_2, \dots, x_m – параметри КФС (зокрема структурні).

Зазначимо, що за потреби наведену схему взаємодії КФС з її оточенням можна уточнити, додавши до неї збурення Z_c , які вносять КФС у фізичне середовище та збурення Z_p , які фізичне середовище вносять у роботу КФС.

Під компонентою КФС будемо розуміти окремих елемент її структури на тому чи іншому рівні організації роботи КФС. Зокрема, на найбільш базовому рівні структура КФС формується з таких основних компонент: 1) вимірювальних (сприйняття стану фізичних процесів); 2) виконавчих (здійснення керівних впливів на фізичні процеси); 3) компонентів управління (реалізація закону управління фізичним процесом); 4) комунікаційних (передавання інформації між іншими компонентами); 5) обчислювальних (обробка та зберігання інформації); 6) інтерфейсних (забезпечення взаємодії КФС з користувачами); 7) компонентів управління споживанням енергії іншими компонентами. Вибір необхідної кількості зазначених компонент та схеми їх поєднання між собою визначає конкретну структуру КФС. На вищих рівнях організації роботи КФС поняття “компонент” розширюється так, щоби відповідати змісту функціонального розподілу кібернетичних засобів на цих рівнях.

Поведінка КФС в її динаміці характеризується суперпозицією процесів таких трьох типів: 1) процеси взаємодії КФС з об'єктами фізичного простору; 2) процеси взаємодії КФС з користувачами (людьми та іншими системами, наприклад, системами штучного інтелекту); 3) процеси взаємодії компонент КФС, зокрема 3.1) вимірювально-обчислювальні процеси, в яких задіяні вимірювальні та обчислювальні компоненти; 3.2) процеси управління, в яких задіяні вимірювальні, виконавчі, обчислювальні компоненти та компоненти управління; 3.3) обчислювальні процеси, в яких задіяні обчислювальні та, можливо, комунікаційні компоненти.

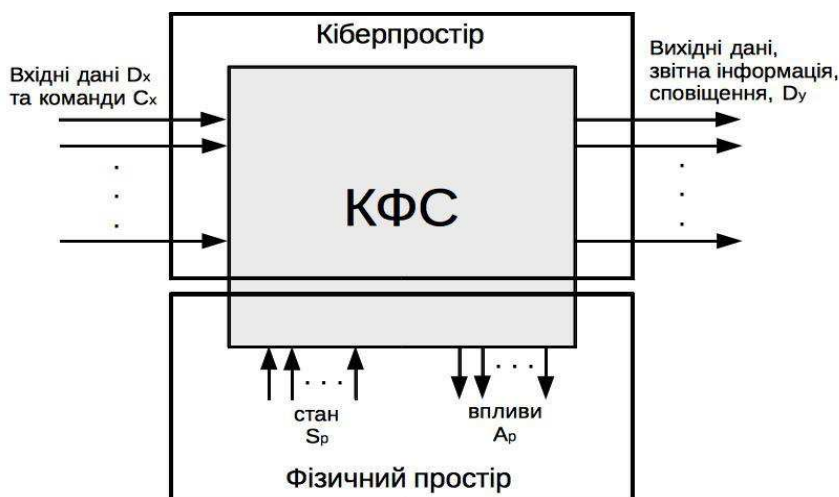


Рис. 1. Узагальнена схема взаємодії КФС з оточенням

Зазначимо також деякі особливості КФС, які ускладнюють їх дослідження і, зокрема, створюють труднощі при побудові їх моделей: 1) велика різноманітність компонент КФС, особливо на верхніх рівнях організації їх роботи; 2) великі масштаби типових КФС, як з погляду великої кількості компонент, так і з погляду порівняно великої кількості рівнів організації роботи КФС; 3) розподіленість компонент у просторі та мобільність компонент КФС; 4) висока динаміка змін (як зовнішніх, пов'язаних з фізичними процесами, так і внутрішніх, пов'язаних з роботою самої КФС та доступних їй ресурсів); 5) багатокритеріальність оцінювання ефективності роботи КФС.

Організація функціонування компонент КФС

Розглянемо організацію функціонування компонент КФС (рис. 2) з погляду розвитку принципу зворотного зв'язку [5, 6, 14, 15] у поєднанні з концепцією багаторівневих систем (систем з ієрархічною структурою) [14, 16, 17] в контексті КФС. У цьому випадку принцип зворотного зв'язку реалізований послідовністю дій із визначення зміни стану s_p фізичного процесу (ФП) p ,

аналізу стану, формування та здійснення керівних впливів a_p на основі результатів аналізу. Концепцію багаторівневих систем відображено в двох аспектах: 1) поруч з компонентами базового рівня організації роботи КФС наведено компоненти вищих рівнів організації (наприклад, компонент “сенсорна система” містить вимірювальні, обчислювальні та комунікаційні компоненти з набору основних компонент); 2) наведено різницю у використанні компонент одного типу з різними характеристиками (вбудовані та високопродуктивні обчислювальні засоби) для реалізації складніших компонент різних рівнів організації роботи КФС.

У наведеній схемі (рис.2) використано такі компоненти КФС: 1) $S(p)$ – сенсорна система; 2) $A(p)$ – виконавча система; 3) K_e – вбудовані (локальні) обчислювальні засоби (зокрема $K_e(S)$ – засоби управління збиранням даних про ФП, $K_e(A)$ – засоби управління ФП); 4) C – засоби комунікації; 5) K_h – високопродуктивні (віддалені) обчислювальні засоби (зокрема $K_h(S)$ – засоби організації збирання даних про ФП, $K_h(M)$ – засоби аналізу даних та моделювання ФП, $K_h(A)$ – засоби прийняття рішень з управління ФП). Згідно з логікою організації функціонування, зазначені компоненти утворюють такі два кластери компонент: 1) $[(S(p), K_e(S)), (A(p), K_e(A))]$, 2) $(K_h(S), K_h(M), K_h(A))$, перший з яких, своєю чергою, складається з двох підкластерів: $(S(p), K_e(S))$ та $(A(p), K_e(A))$.

Отже, можна запропонувати таку концептуальну модель організації функціонування компонент КФС:

$$M_F = \{[(S(p), K_e(S)), (A(p), K_e(A))], C, (K_h(S), K_h(M), K_h(A))\} \times P, \quad (2)$$

де $P = \{p\}$ – множина фізичних процесів, з якими взаємодіє КФС. Зазначимо, що від концептуальної моделі M_F можна перейти до конкретної математичної моделі, сформульованої, наприклад, у термінах одного з числень процесів (process calculus). Для цього необхідно визначити алфавіт подій, наприклад, у вигляді елементарних операцій, які відповідають компонентам базового рівня організації роботи КФС, та встановити потрібну відповідність між діями над компонентами КФС і алгебраїчними операторами числення процесів.

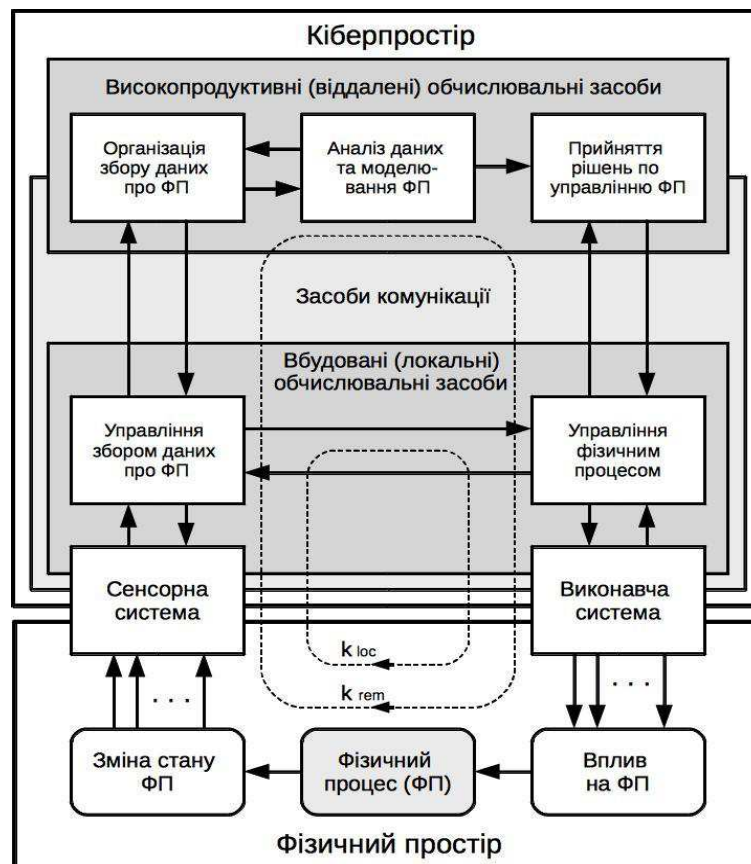


Рис. 2. Організація функціонування компонент КФС

Модель M_F може також слугувати відправною точкою для дослідження та застосування у контексті КФС закону необхідної розмаїтості (the law of requisite variety), який запропонував Вільям Ешбі [6] для кібернетичних систем. За цим законом доцільно дослідити принцип функціональної повноти у застосуванні до КФС. Слід також зауважити, що за законом необхідної розмаїтості КФС дає змогу максимізувати можливості людини з управління фізичними процесами завдяки об'єднанню в своєму складі практично всіх видів кібернетичних пристроїв у всьому їх розмаїтті.

Контури взаємодії КФС із фізичними процесами

Узагальнюючи принцип зворотного зв'язку у поєднанні з концепцією багаторівневих систем у контексті КФС, можна виділити такі два (вкладені один в один) контури взаємодії КФС з ФП (рис. 2): 1) k_{loc} – контур локальної (безпосередньої) взаємодії, в якому задіяно компоненти $S(p)$, $A(p)$, $K_e(S)$, $K_e(A)$; 2) k_{rem} – контур віддаленої (опосередкованої) взаємодії, в якому додатково задіяні компоненти $K_h(S)$, $K_h(M)$, $K_h(A)$. У цьому випадку утворюється ієрархія контурів взаємодії різного масштабу як відображення ієрархії задач зростаючої складності, для розв'язання яких призначена КФС. Враховуючи великий спектр задач різної складності, для розв'язання яких застосовують КФС, доцільно перейти від пари контурів взаємодії (k_{loc} , k_{rem}) до множини контурів $K = k_1, k_2, \dots, k_n$ (рис. 3). Зауважимо, що для множини K зберігається принцип функціональної вкладеності контурів (згідно із зростанням індексу). Оскільки одну і ту саму компоненту можна задіяти одночасно в декількох контурах взаємодії, додатково можна розглядати проблему “протилежних” вимог до режиму роботи цієї компоненти, які висуваються в межах різних контурів взаємодії.

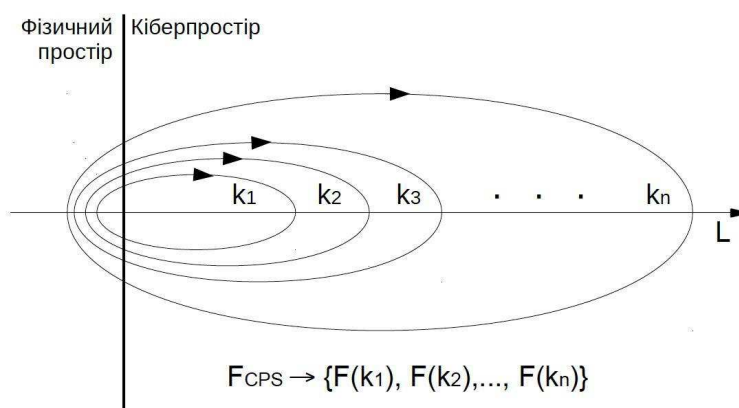


Рис. 3. Контури взаємодії КФС із ФП

Для кожного окремого контуру взаємодії КФС з ФП можна визначити: 1) масштаб $L(k)$ як чисельний показник ступеня “заглиблення” контуру у кіберпростір (рис. 3); 2) характерний час $T(p)$ фізичного процесу, з яким ще “встигає” взаємодіяти цей контур з огляду на інтегральні “швидкісні” характеристики відповідних компонент; 3) підзадача $F(k)$, яку вирішує цей контур у межах загальної задачі всієї КФС. Наприклад, як величину $L(k)$ можна використати нормовану оцінку швидкості роботи засобів комунікації, які поєднують компоненти одного контуру (взаємодія компонент на одному кристалі (SoC), взаємодія компонент у складі одного пристрою, взаємодія компонент різних пристроїв за швидкісним інтерфейсом, взаємодія компонент по локальній мережі, взаємодія компонент по мережі Інтернет, взаємодія компонент через супутникові канали зв'язку). Загалом “швидкі” контури меншого масштабу здатні взаємодіяти зі швидшими ФП (з малим $T(p)$), проте обмежені у доступних їм обчислювальних ресурсах. Водночас “повільні” контури більшого масштабу можуть взаємодіяти лише з повільнішими ФП (з великими $T(p)$), проте мають доступ до потужніших обчислювальних ресурсів.

Застосувавши ідею контуру до інших типів взаємодії, в яких бере участь КФС, отримаємо таку класифікацію контурів за загальним функціональним призначенням: 1) $K(p)$ – контури взаємодії компонент КФС з ФП; 2) $K(u)$ – контури взаємодії компонент КФС із користувачами; 3) $K(c)$ – контури внутрішньої службової взаємодії компонент КФС.

Отже, можна запропонувати таку концептуальну модель контурів взаємодії:

$$M_K = \{(P \times K(p)), (U \times K(u)), K(c)\} \times \{R(g), R(q), R(e)\}, \quad (3)$$

де $P=\{p\}$ – множина ФП; $U=\{u\}$ – множина користувачів; $R(g)$ – множина обчислювальних ресурсів; $R(q)$ – множина комунікаційних ресурсів; $R(e)$ – множина енергоресурсів.

У межах моделі M_K можна сформулювати такі задачі: 1) формування набору контурів взаємодії, необхідних для розв’язання поставленої задачі функціональною декомпозицією (розбиття задачі на підзадачі), тобто забезпечення відображення $F_{CSP} \rightarrow \{F(k)\}$; 2) організація спільної роботи контурів, зокрема синхронізація та координація процесів прийняття рішень, реалізованих у різних контурах взаємодії; 3) розподіл компонент та ресурсів за контурами взаємодії (наприклад, на основі розв’язку задачі про розміщення об’єктів (facility location problem)), зокрема пошук оптимального розподілу обчислювальних ресурсів за контурами K з врахуванням обмежень, які накладаються на контури різного масштабу; 4) реконфігурація компонент “швидких” контурів меншого масштабу, враховуючи розв’язки відповідних оптимізаційних задач, отриманих у “повільних” контурах більшого масштабу.

Узгодження взаємодії КФС із фізичними процесами

За ідеями самоорганізації [6], гомеостазу [6,14], параметричної та структурної адаптації [18] можна запропонувати принцип узгодження [19], згідно з яким для максимізації цільової функції F_{CSP} багаторівнева структура компонент КФС має відображати структуру фізичних процесів, з якими вона взаємодіє. З цього погляду загальні функціональні можливості КФС обмежені максимальним ступенем відповідності її структурних параметрів структурним параметрам фізичних процесів, який можна забезпечити під час побудови КФС. Відтак важливими завданнями під час дослідження та розроблення КФС є пошук шляхів 1) визначення якісних та кількісних аспектів ступеня відповідності; 2) його збільшення завдяки новим структурним рішенням при побудові КФС. Одним з важливих варіантів цієї проблеми є організація взаємодії КФС з нелінійними динамічними системами, для яких характерна висока динаміка структурних змін. У цьому випадку для забезпечення високого ступеня відповідності потрібно реалізувати: 1) можливість структурних змін у КФС за допомогою апаратно-програмної інфраструктури обчислювальних та комунікаційних засобів, здатних до реконфігурації та адаптації (тобто забезпечити достатній запас адаптаційних можливостей (adaptive capacity) КФС); 2) методи управління структурними змінами у КФС з використанням принципів самоорганізації та машинного навчання. Такий підхід відкриває нові можливості з організації цілеспрямованої взаємодії КФС з синергетичними фізичними процесами, характерними для найскладніших фізичних систем та явищ, з якими стикається людина.

У межах моделі M_K запас адаптаційних можливостей КФС можна забезпечити завдяки організації спільної роботи контурів взаємодії з ФП за принципом багатопетлевого зворотного зв’язку [20] (рис. 4). За таким способом організації отримують “штучну” нелінійну динаміку взаємодії КФС з фізичними процесами, яка самостійно “підлаштовується” під структурні параметри відповідних динамічних нелінійних фізичних систем, зокрема завдяки синергетичному ефекту від об’єднання контурів взаємодії K у межах методів структурної адаптації.

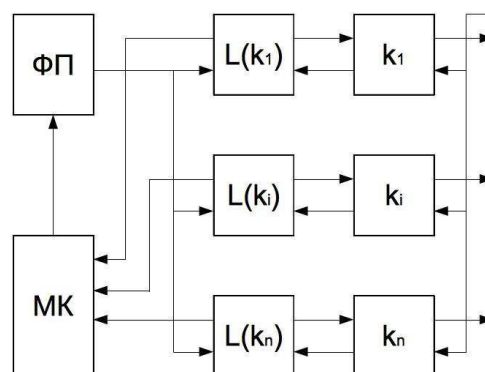


Рис. 4. Організація спільної роботи контурів K за принципом багатопетлевого зворотного зв’язку (ФП – фізичний процес; МК – механізм координації)

Зокрема, для розв'язання загальної задачі структурної адаптації контурів взаємодії К потрібно розв'язати такі оптимізаційні задачі: 1) пошук якнайкращого “кількісного” співвідношення дій, спрямованих на дослідження ФП (максимальне уточнення моделей ФП у відповідних контурах), та дій, спрямованих на керування переходом ФП у потрібний стан (максимізація F_{CPS}); 2) балансування складності моделей ФП у відповідних контурах взаємодії з огляду на співвідношення повноти (“точності”) моделі та швидкості розрахунку розв'язку (прогнозу) на її основі, тобто узгодження складностей ряду моделей фізичних процесів $\{M_i\}$ у контурах К з показниками кількості інформації, яка “обертається” в цих контурах. Для розв'язання другої задачі можна запропонувати спосіб розрахунку показника кількості інформації, що надходить у компоненти і-го контуру, на основі спрощеної форми рівняння передачі Фрііса (Friis transmission equation) [21]. За цим способом показник кількості отриманої інформації

$$R'(k) = [f_1(R(k)) \times f_2(T(p))] / [f_3(L(k))]^2, \quad (4)$$

де $R(k)$ – показник кількості інформації, відправленої у контур взаємодії k ; $T(p)$ – характерний час ФП, інформація про який передається; $L(k)$ – масштаб контуру k (наприклад, у вигляді оцінки затримки передачі інформації комунікаційними компонентами контуру); f_1, f_2, f_3 – масштабуючі лінійні перетворення. Формула (4) відображає той факт, що показник кількості отриманої інформації стає то меншим, що довше інформація передається по контуру взаємодії (зменшуючись внаслідок “старіння” (втрати актуальності)). Водночас що більше характерний час $T(p)$ (тобто що “повільніше” ФП, з яким взаємодіють компоненти контуру k), то менше проявляється цей ефект. Зауважимо, що одним з найперспективніших варіантів показника кількості інформації з погляду цієї задачі є міра доцільності інформації, яку запропонував О. О. Харкевич [22] і яку визначають як зміну ймовірності досягнення цілі за отримання додаткової інформації, і належить до семантичних мір інформації [23].

Концептуальна модель інтегрування компонент КФС

Важливою проблемою при створенні нових КФС є пошук шляхів використання вже існуючих компонент КФС широкого спектра застосування та існуючих архітектурних рішень побудови КФС. Для вирішення цієї проблеми доцільно розробляти та використовувати нові підходи до автоматизації створення та конфігурування КФС, зокрема автономних адаптивних КФС, побудованих на основі принципів самоорганізації та децентралізованого управління [24].

Сценарій автоматизованого створення та конфігурування КФС може виглядати так. 1. Користувач (розробник) спілкується природною мовою з інтерфейсним агентом і формулює постановку задачі (дослідницька, виробнича, громадсько-соціальна). Роль користувача також може виконувати автономна система з елементами штучного інтелекту. 2. У відповідь на запит користувача в автоматичному режимі створюється примірник автономної адаптивної КФС на основі компонентів універсальної конфігуровної платформи КФС (при цьому допускається одночасне використання декількох різними примірниками КФС одного компонента). 3. Створений примірник КФС починає свою роботу і “звітує” про це користувачу. 4. У процесі роботи користувач уточнює постановку задачі та, можливо, вносить необхідні зміни в структуру і алгоритми роботи КФС (конфігурація). 5. Створена та відлагоджена КФС працює в автономному режимі, розв'язуючи поставлену користувачем задачу (надаючи відповідний сервіс іншим користувачам тощо). 6. За рішенням користувача створену КФС додають у вигляді “шаблону проектування” до колекції (бібліотеки) типових рішень. 7. Створеною КФС (цим примірником або новоствореним іншим примірником) користуються інші користувачі та створюють свої варіанти КФС на його основі.

Реалізація цього сценарію потребує уніфікації способів взаємодії компонентів КФС та побудови відповідних моделей інтегрування компонентів КФС в єдину систему. Наприклад, на основі ідеї багаторівневої побудови КФС можна розглянути інтегрування компонентів КФС у двох аспектах (рис. 5): 1) горизонтальне інтегрування (h): у межах одного рівня багаторівневої схеми, 2) вертикальне інтегрування (v): міжрівневе. Відповідно можна розглянути два типи зв'язків між окремими компонентами КФС:

1) “слабкий” зв'язок – у тому розумінні, що компоненти, які інтегруються цим зв'язком, не залежать один від одного через деякий заданий рівень універсальності функціональних послуг та сервісів, які надають ці компоненти;

2) “сильний” зв’язок – у тому розумінні, що компоненти, які інтегруються цим зв’язком, максимально залежать один від одного з погляду виконання покладених на них задач (і, можливо, поодиноці більше ні до чого не здатні).

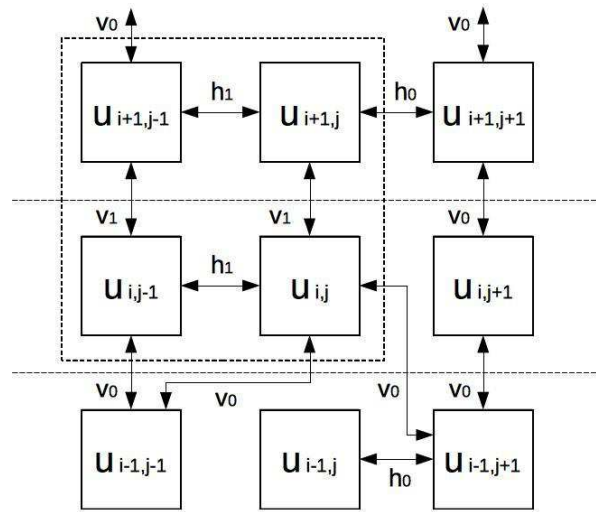


Рис. 5. Схема інтегрування компонент КФС

При цьому можна додатково розглянути ускладнення поняття “сили-слабкості” зв’язків і відповідне збільшення типів зв’язків, враховуючи деяку змістовну інтерпретацію їх призначення. Наприклад, на основі уніфікації базового інтерфейсу функціональної взаємодії компонент (протоколу взаємодії) його приймають як нижній рівень “слабкості” зв’язку (тобто як інтерфейс інтегрування найуніверсальніших компонент – максимально “слабкий” зв’язок). Після цього від нього віднімаються (чи додаються до нього) деякі елементи взаємодії в такий спосіб, що з кожним таким відніманням (додаванням) зв’язок стає все “сильнішим”, тобто все більше взаємозумовлює роботу компонент, які він інтегрує (тобто компоненти тією самою мірою втрачають свою універсальність у контексті цього зв’язку). Відповідно максимально “сильний” зв’язок – це повна відсутність уніфікації інтерфейсу взаємодії (тобто “спеціалізований” зв’язок, який може забезпечити взаємодію лише цих двох компонент і жодних інших). Так можна побудувати концептуальну модель інтегрування, в якій “сила” (рівень) інтегрування Q будь-яких двох компонент (u, w) зумовлена ступенем їх універсальності і є змінним параметром. Оскільки йдеться про структуру КФС (рис. 5), то вигідніше, щоб це була дискретна величина, тобто рівень інтеграції $Q(u, w)$ набував би значення з деякої множини $\{x_i\}$, $i=1, \dots, n$, де n – задана кількість рівнів інтегрування.

За найпростішим варіантом моделі (“слабкий” / “сильний” зв’язок) $n=2$, тобто $Q(u, w) = \{0,1\}$, де 0 – кодує “слабкий” зв’язок, а 1 – “сильний” зв’язок. Відповідно декартів добуток множини рівнів інтегрування та аспектів (напрямок) інтегрування (h, v) дає всі можливі способи інтегрування двох довільних компонент u та w :

$$(Q(u, w) = \{0,1\}) \times (h, v) = \{u(h_0)w, u(v_0)w, u(h_1)w, u(v_1)w\}. \quad (5)$$

У межах цієї моделі можна визначити *кластер* сильнозв’язаних компонент КФС як набір компонент, які пов’язані між собою лише зв’язками $u(h_1)w$ та $u(v_1)w$. Передбачено, що кластер сильнозв’язаних компонент створюють для розв’язання деякої однієї задачі і в першому наближенні може розглядатись як спеціалізована КФС. При цьому допускається, що деяка компонента u кластера на деякому рівні може мати “слабкі” зв’язки $u(h_0)w$ та $u(v_0)w$, що дає можливість іншим компонентам КФС користатись “послугами”, які надає цей кластер. З цього погляду кластер сильнозв’язаних компонент можна розглядати як додатковий “вимір” інтегрування компонентів КФС.

Розглянуту концептуальну модель інтегрування також можна уточнити за поділом різних аспектів взаємодії компонент. Вище розглянуто лише аспект функціональної взаємодії (як основний з погляду призначення КФС). До нього можна додати інші аспекти, наприклад, конструктивний (компоненти конструктивно рознесені чи знаходяться в одному чипі, корпусі, приміщенні тощо),

енергетичний (одна компонента живиться від джерела в іншій компоненті, чи в них власні джерела живлення тощо), телекомунікаційний (на основі обраної моделі інформаційної зв'язності компонент) і, можливо, інші. Відповідно для кожного з цих аспектів розглядаються окремі рівні інтегрування $\{Q', Q'', \dots\}$, які накладаються на рівні інтегрування за іншими аспектами.

Децентралізоване управління взаємодією компонент КФС

З погляду об'єднання окремих компонент та їх кластерів у межах єдиної структури КФС можливі два основні підходи: 1) побудова архітектури КФС на основі принципів централізованого управління; 2) побудова архітектури КФС на основі принципів децентралізованого управління. Порівнюючи ці два підходи з позицій загальної теорії систем, можна висунути таку гіпотезу. *Централізовані* КФС створюються тільки завдяки *організації* (причому це стосується як процесу, так і результату створення КФС), тоді як *децентралізовані* КФС створюються лише внаслідок *самоорганізації* (причому це так само стосується як процесу, так і результату створення КФС). Тому з огляду на розглянуту вище проблематику узгодження взаємодії КФС з фізичними процесами, розвиток ідей децентралізованого управління в межах КФС є особливо актуальним. Зауважимо також, що наш досвід у галузі дослідження принципів децентралізованого управління (понад 15 років) показує, що окремі ключові проблеми при побудові КФС можна вирішити лише з використанням ресурсу децентралізованого управління (забезпечення живучості КФС, суттєве збільшення запасу адаптаційних можливостей КФС, створення умов для реалізації принципів самоорганізації у роботі КФС тощо).

Треба зауважити, що для дослідження та побудови децентралізованих КФС можна використовувати різні концепції та підходи, найпоширеніші з яких: теорія децентралізованих комп'ютерних систем, теорія колективної поведінки інтелектуальних систем, теорія ройового інтелекту (swarm intelligence), технології багатоагентних систем (multiagent systems), концепція групової або розподіленої робототехніки (distributed robotics) та ін. Наведені концепції суттєво відрізняються, але всі вони по суті є "антагоністами" підходу на основі централізованого управління, внаслідок чого їх можна розглядати як одну галузь. Також зауважимо, що поруч з КФС поки що існують люди. Можна як дискусійну висловити гіпотезу, що централізований підхід до управління (організація) краще підходить для "людських" систем, тоді як децентралізований підхід до управління (самоорганізація) краще підходить для "технічних" (зокрема інформаційних) систем.

Наведемо основні переваги децентралізованого управління взаємодією компонент КФС порівняно з централізованим: 1) децентралізоване управління має перевагу, коли компоненти КФС взаємодіють з великими, унікальними, слабко передбачуваними фізичними системами з сильною випадковою складовою; 2) перевага децентралізованого управління проявляється у КФС з великою кількістю компонентів; 3) децентралізоване управління взаємодією компонент КФС забезпечує більшу надійність та значно більшу живучість системи; 4) децентралізоване управління має перевагу над централізованим з погляду оптимального використання каналів зв'язку, що є особливо важливим для розподілених у просторі КФС, які працюють у режимі реального часу (причому перевага то більша, що більша різниця у масштабах основних контурів взаємодії компонент КФС з ФП); 5) з погляду можливості забезпечення інформаційної взаємодії компонент КФС децентралізоване управління переважає централізоване в тих задачах, де інформаційну взаємодію забезпечити важко або взагалі неможливо (наприклад, в підземному або підводному фізичному середовищі); 6) децентралізоване управління переважає централізоване в тих задачах, в яких сеанси інформаційної взаємодії компонент КФС призводять до великих втрат або взагалі є недопустимими протягом деякого часу (наприклад, з огляду мінімізації збурень, які вносять сеанси інформаційної взаємодії у фізичний процес у задачах високоточних вимірювань).

Висновки

Розглянуто підходи до побудови концептуальних моделей кіберфізичних систем. Запропоновано узагальнену схему взаємодії КФС з оточенням та визначено набір основних компонент КФС на її базовому рівні. Розглянуто організацію функціонування компонент КФС з погляду розвитку принципу зворотного зв'язку у поєднанні з концепцією багаторівневих систем. Запропоновано концептуальну модель організації функціонування компонент КФС. Визначено

поняття контуру взаємодії КФС з фізичними процесами на основі узагальнення принципу зворотного зв'язку в контексті КФС. На основі класифікації контурів за загальним функціональним призначенням запропоновано концептуальну модель контурів взаємодії. Розглянуто проблему узгодження взаємодії КФС з фізичними процесами. Запропоновано спосіб організації спільної роботи контурів взаємодії з ФП за принципом багатопетлевого зворотного зв'язку з метою забезпечення запасу адаптаційних можливостей КФС. Запропоновано спосіб розрахунку показника кількості інформації, що надходить у компоненти контуру взаємодії КФС з ФП, на основі спрощеної форми рівняння передачі Фрііса. Запропоновано концептуальну модель інтегрування компонент КФС на основі класифікації типів зв'язків між компонентами КФС. Наведено основні переваги децентралізованого управління взаємодією компонент КФС.

Наукові результати, подані у цій статті, було отримано в межах дослідницького проекту ДБ/КІБЕР з реєстраційним номером 0115U000446, 01.01.2015–31.12.2017, фінансово підтриманого Міністерством науки і освіти України.

1. Rajeev Alur, *Principles of Cyber-Physical Systems*, The MIT Press, 2015. – 464 p. 2. Edward A. Lee. *Fundamental Limits of Cyber-Physical Systems Modeling*, *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, Vol. 1, Issue 1, 2016. – pp.3:1–3:26. 3. Siddhartha Kumar Khaitan and James D. McCalley, *Design Techniques and Applications of CyberPhysical Systems: A Survey*, *IEEE Systems Journal*, Vol.: 9, Issue: 2, June 2015. – pp.350–365. 4. Голембо В. А., Бочкарьов О. Ю. Підходи до побудови концептуальних моделей кіберфізичних систем // *Матеріали Другого наукового семінару “Кіберфізичні системи: досягнення та виклики”*, НУЛП, Львів, 21–22 червня, 2016 (електронне видання). 5. Винер Н. *Кибернетика*. – М.: Сов. радио, 1958. 6. Эшби У. Росс, *Введение в Кибернетику*. – М.: ИИЛ, 1959. 7. Jay Lee, Behrad Bagheri, Hung-An Kao, *A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems*, *Manufacturing Letters*, Volume 3, 2015. – pp.18–23. 8. Robin Singh Bhadoria, Radhakishan Yadav, and Geetam Singh Tomar, *Architectural Analysis of Cyber-Physical Systems (Chapter 2. in Cyber-Physical Systems: A Computational Perspective*, Chapman and Hall/CRC, 2015. – 644 p.) – pp.49–77. 9. François Fouquet, Olivier Barais, Noël Plouzeau, Jean-Marc Jézéquel, Brice Morin, et al.. *A Dynamic Component Model for Cyber Physical Systems*. *15th International ACM SIGSOFT Symposium on Component Based Software Engineering*, Jul 2012, Bertinoro, Italy. 2012. – pp.135–144. 10. P. Derler, E. A. Lee and A. Sangiovanni Vincentelli, “Modeling Cyber-Physical Systems,” in *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 1, pp. 13–28, Jan. 2012. 11. *Formal Modeling and Verification of Cyber-Physical Systems: 1st International Summer School on Methods and Tools for the Design of Digital Systems*, eds. Rolf Drechsler, Ulrich Kühne, Bremen, Germany, September 2015. – 313 p. 12. *Cyber Physical Systems. Design, Modeling, and Evaluation*, *Proceedings of the 5th International Workshop, CyPhy 2015, Amsterdam, The Netherlands, October 8, 2015*. – 147 p. 13. Edward A. Lee, *The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models, Sensors*, 2015, 15(3). – pp. 4837–4869. 14. Stafford Beer, *Cybernetics and Management*, 1959. – 214 p. 15. Karl Johan Aström, Richard M. Murray, *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*, Princeton University Press, 2010. – 408 p. 16. Месарович М., Мако Д., Такахара И. *Теория иерархических многоуровневых систем*. – М.: Мир, 1973. – 344 с. 17. Хакимов Э. М. *Моделирование иерархических систем*. – Казань: Изд-во Казанского университета, 1986. – 160 с. 18. Растринин Л. А. *Адаптация сложных систем*. – Рига: Зинатне, 1981. – 376 с. 19. Бочкарёв А.Ю., Голембо В. А. *Самоорганизация коллектива мобильных измерительных агентов в задаче распределенных контактных измерений // Искусственный интеллект*. – Донецк, 2005. №3. – С.723–731. 20. Яковлев В. Н. *Генераторы с многопетлевой обратной связью*. – М.: Связь, 1973. – 189 с. 21. Рутледж Д. *Энциклопедия практической электроники*. – ДМК, 2002. – 528 с. 22. Харкевич А. А. *О ценности информации // Проблемы кибернетики.. Вып. 4*. – М.: Физматгиз, 1960. 23. Темников Ф. Е. *Теоретические основы информационной техники*. – М.: Энергия, 1971. – 424 с. 24. Бочкарьов О. Ю., Голембо В. А. Використання технологій інтелектуального збору даних у кіберфізичних системах // *Матеріали Першого наукового семінару “Кіберфізичні системи: досягнення та виклики”*. – Нац. ун-т “Львівська політехніка” – Львів, 25–26 червня, 2015. – С. 24–27.