

ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ КОНЦЕПТУАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

© Голембо В.А., Бочкар'юв О.Ю., 2016

Розглянуто підходи до побудови концептуальних моделей кіберфізичних систем (КФС). Наведено аналіз поняття та принципів побудови КФС. Запропоновано класифікацію кіберфізичних систем та опис концептуальних моделей на її основі.

Ключові слова: кіберфізична система, концептуальна модель

APPROACHES TO CREATING CONCEPTUAL MODELS OF CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

© Golembo V., Botchkaryov A., 2016

Approaches to creating conceptual models of cyber-physical systems are considered. The analysis of a concept and development principles of a cyber-physical system is provided. The classification of cyber-physical systems and the description of corresponding conceptual models are proposed.

Keywords: cyber-physical system, conceptual model

1. Аналіз поняття та принципів побудови КФС.

Масштаби проектування, розробки та застосування КФС в останній час швидко зростають. Вирішальними чинниками, які обумовлюють цей процес, є розвиток обчислювальних та комунікаційних можливостей сучасних обчислювальних засобів та перехід до моделей мобільних обчислень, в яких окремих вимірювально-обчислювальний вузол КФС може переміщуватись у просторі. При цьому зберігається тенденція збільшення автономності КФС за рахунок передачі їм суттєвої частини повноважень у прийнятті рішень як в області практичних задач, які вирішують ці КФС, так і в області оптимізації та забезпечення надійності роботи самих КФС. З точки зору історичної перспективи, концепцію КФС можна вважати шостим еволюційним етапом розвитку інформаційних технологій: 1) мейнфрейми (60-ті роки), 2) персональні комп'ютери (80-ті роки), 3) інтернет (90-ті роки), 4) GRID-системи (кінець 90-их років), 5) хмарні технології (cloud computing) (2000-ні роки), 6) КФС (2010-ті роки). Аналіз поняття КФС доцільно розпочати з визначення більш загального терміну «кібернетика». Згідно класичного визначення Норберта Вінера кібернетика – це наука про загальні закони управління та зв'язку в тварині та в машині [1,2]. У порівнянні з кібернетикою загально визнаного поняття КФС на даний час не існує. Тому потрібно більш детально розглянути принципи побудови та основні ознаки КФС, щоб краще зрозуміти їх проблематику.

Відповідно визначимо деякі характерні особливості кіберфізичних систем. 1) КФС взаємодіють з реальним фізичним середовищем. 2) КФС можуть функціонувати або впливати на середовище (вносити деформуючі зміни у середовище). Також суттєво, що ці

впливи (деформуючі зміни) можуть бути зворотніми та незворотніми. 3) КФС можуть бути автономними, безпілотними, самокерованими. 4) Кіберфізичні системи будуються із залученням всіх трьох основних сфер: матеріали та речовина, енергія, інформація (тобто кіберфізичні системи не мають відношення до віртуальної реальності). 5) Реалізація КФС вимагає наявності всіх п'яти основних галузей інформаційної сфери: вимірювання (отримання або сприймання), зв'язок (передача), керування (вплив), обробка (опрацювання), запам'ятовування інформації. Зауважимо, що при відсутності обробки – це система автоматичного регулювання, яка не дозволяє здійснювати адаптивне та рефлексивне керування. При відсутності елементів керування – це вимірювально-обчислювальна система, яка є важливою підсистемою кіберфізичних систем. Наявність обробки дає можливість реалізувати адаптивне та рефлексивне керування, тобто реалізувати кіберфізичну систему в повному обсязі. 6) Кіберфізичні системи можуть бути централізовані та децентралізовані. Треба чітко наголосити, що: *централізовані* КФС створюються тільки шляхом *організації* (при чому це відноситься як до процесу так і до результату створення КФС), в той час як *децентралізовані* КФС створюються лише шляхом *самоорганізації* (при чому це так само відноситься як до процесу, так і до результату створення КФС). Не можемо приховати, що ми віддаємо перевагу децентралізованим КФС, оскільки займаємося дослідженнями в області децентралізованого управління більше 15 років [3, 4].

Треба зауважити, що для дослідження та побудови децентралізованих КФС можуть використовуватись різні концепції та підходи, найбільш поширені з яких: теорія децентралізованих комп'ютерних систем, теорія колективної поведінки інтелектуальних систем, теорія ройового інтелекту (swarm intelligence), багатоагентні системи (multiagent systems), концепція групової або розподіленої робототехніки (distributed robotics) та ін. Наведені концепції досить суттєво відрізняються, але всі вони по суті є «антогоністами» централізованих КФС, внаслідок чого їх можна розглядати як одну галузь. Також, зауважимо, що поруч з КФС поки що існують люди. Можна, в порядку дискусії, висловити гіпотезу, що централізований підхід до управління (організація) краще підходить для «людських» систем, в той час як децентралізований підхід до управління (самоорганізація) краще підходить для «технічних» (зокрема інформаційних) систем.

Наведемо основні переваги децентралізованих КФС у порівнянні з централізованими: 1) у випадку застосування великих, унікальних, слабо передбачуваних систем з сильною випадковою складовою; 2) при керуванні системами з великою кількістю компонентів; 3) децентралізовані КФС забезпечують більшу надійність та живучість; 4) з точки зору оптимального використання каналів зв'язку, що є особливо важливим для розподілених у просторі КФС які працюють в режимі реального часу, децентралізовані КФС тим більше переважають централізовані, чим більша відстань між виконавчими елементами та блоками (центрами) управління; 5) з точки зору можливості забезпечення інформаційної взаємодії між елементами системи, децентралізовані КФС мають перевагу в тих задачах, де інформійну взаємодію забезпечити важко або неможливо (наприклад, в підземному або підводному середовищі).

При застосуванні в кіберфізичних системах ідеології багатоагентних систем, потрібно розрізняти інтелектуальних (когнітивних) та реактивних (reactive) агентів. Ми притримуємося тези, що кількість інтелектуальних агентів в колективі не може бути значною: об'єднати велику кількість інтелектуальних агентів для виконання одної задачі досить складно. В багатьох випадках кращих результатів можна досягнути застосовуючи реактивних агентів, кількість яких у колективі може бути значною.

Треба також відмітити, що з точки зору поділу систем на закриті та відкриті, закритих КФС не існує, оскільки закриті системи не пов'язані із зовнішнім середовищем. КФС можуть бути тільки відкритими системами внаслідок того, що вони пов'язані із зовнішнім

середовищем. Доцільно також розділяти відкриті КФС на пасивні та активні. Пасивні лише *функціонують* в середовищі, а активні не тільки функціонують, але і *впливають* на середовище. При цьому поділ відкритих КФС за цим критерієм на пасивні та активні пов'язаний з деякими труднощами, які важко подолати без спроби детальніше розглянути (диференціювати) середовища в яких працюють відповідні КФС. Наприклад, для початку можна розрізняти природне (неживе), біологічне (живе), «технічне» (штучне, неживе) та суспільне (штучне, «живе») середовища. Також можна розрізняти типи впливу на середовище, який може бути здійснений виконавчими елементами КФС, зокрема: механічний (включаючи гідравліку та механіку), електричний (включаючи електроніку та магнітоніку), оптичний, акустичний, тепловий, хімічний, біологічний, квантовий та їх комбінації (наприклад оптоелектричний, оптоакустичний та ін.).

2. Підходи до класифікації та моделювання КФС

Важливим аспектом проблеми побудови та організації роботи КФС є моделювання та класифікація їх принципів роботи та можливостей, в тому числі виходячи з характеру взаємодії КФС з середовищем, в якому вони розміщуються. З цієї точки зору можна запропонувати класифікацію КФС на основі наступних класифікаційних ознак.

1) За можливістю переміщення вузлів КФС (наприклад, автономних вимірювально-обчислювальних вузлів) у просторі середовища можна розрізняти нерухомі ($m = 0$) вузли та мобільні ($m = 1$) вузли КФС. При цьому можна розглядати складні моделі організації переміщення $S(m)$ вузлів КФС [5-7]. Зауважимо, що шляхи організації мобільності автономних вузлів розглянуті нами в [5-7], де зокрема наведено класифікацію способів організації переміщення у середовищах різного типу та обговорена проблема методичних похибок вимірювання, які виникають внаслідок переміщення вимірювально-обчислювальних вузлів.

2) За характером розміщення вузлів КФС у просторі середовища можна розрізняти територіально зосереджені ($d = 0$) та територіально розподілені ($d = 1$) КФС. В даному випадку також можна розглядати складні моделі неоднорідності розташування $S(d)$ вузлів КФС у просторі.

3) За способом організації процесів прийняття рішень та управління можна розрізняти централізовані ($u = 0$) та децентралізовані ($u = 1$) КФС. Більш складним варіантом може бути застосування моделі $S(u)$, яка окрім повністю централізованої та повністю децентралізованої схеми задає також проміжні варіанти комбінації обох схем управління в різних «пропорціях».

4) За способом впливу КФС на середовище можна розрізняти КФС зі статичними нерухомими ($e = 0$) органами впливу на середовище (приклад: система нагрівання та охолодження повітря) та КФС з динамічними рухомими ($e = 1$) органами впливу на середовище (приклад: робототехнічний маніпулятор для збирання проб). Поєднання органів впливу різного типу у одній КФС можна описати відповідною моделлю $S(e)$.

5) За можливостями впливу КФС на середовище можна розрізняти КФС, які не трансформують (не змінюють) ($r = 0$) середовище, та КФС, які трансформують (змінюють) ($r = 1$) середовище своїми діями. Додатково трансформуючі впливи можуть класифікуватись як зворотні та незворотні. Поєднання можливостей впливу різного типу у одній КФС можна описати відповідною моделлю $S(r)$.

Окремо, доцільно класифікувати КФС за способами забезпечення різних аспектів автономності роботи, зокрема 1) конструктивної автономності (модель A_K), енергетичної автономності (модель A_E) та функціональної автономності (модель A_F). Таким чином на основі запропонованих класифікацій та відповідних моделей можна побудувати наступну концептуальну модель КФС:

$$CPS(k) = \{(C(m), C(d), C(u), C(e), C(r))\} \times \{(A_K, A_E, A_F)\},$$

різні реалізації якої $k=1,2,\dots$ задаються вибором вигляду відповідних моделей-компонент та визначенням їх параметрів. Зокрема, виходячи із запропонованої вище класифікації можна сформуванати 32 варіанта КФС з точки зору її взаємодії з середовищем та способом організації її роботи. При цьому кожному варіанту з $\{(C(m),C(d),C(u),C(e),C(r))\}$ можна поставити у відповідність деякий узагальнений показник складності розробки та побудови КФС, формування якого може бути предметом подальших досліджень. Відмітимо, що створюючи та розвиваючи концептуальні моделі КФС ми по суті підходимо до вирішення проблеми *синтезу* кіберфізичних систем на відміну від багатьох інших робіт, в яких наводиться лише детально викладений *аналіз* КФС (див., наприклад, [8]). Також слід зауважити, що поруч з розглядом кіберфізичних систем доцільно розглядати кібербіологічні та кіберсоціальні системи, що на нашу думку відповідає класичному кібернетичному підходу.

Розглянемо декілька прикладів систем, які дозволять краще зрозуміти специфіку КФС.

1. Система кондиціонування повітря. Дана система в чистому вигляді не є кіберфізичною. Але, якщо вбудувати в цю систему спеціалізований обчислювач, який виконує, наприклад, алгоритми пов'язані з адаптацією, які зокрема потребують утримання в пам'яті попередньої інформації про стан середовища, ця система стає кіберфізичною.

2. Автоматична система для гри в шахи. При всій повазі до сучасних «сильних» шахових програм, які без сумніву здатні обіграти авторів, вони не є кіберфізичними системами. Відображення ходів шаховими фігурами на дисплей не є ознакою кіберфізичних систем. В той же час при додаванні в систему, автоматичного пересування «справжніх» фігур (наприклад, роботизованою рукою-маніпулятором) ця система набуває риси кіберфізичної системи.

3. Автономна система ліквідації нафтових плям на поверхні води. Принцип роботи: після знаходження нафтової плями автономні мобільні вузли рівномірно (якщо це потрібно) розміщуються по периметру плями та «огорожують» її певними засобами; ліквідація плями може здійснюватися різними шляхами: 1) механічний вплив («стискання» плями), 2) гідравлічний вплив (забір забрудненої нафтою води у ємності автономних вузлів чи спеціалізованого судна), 3) хімічний вплив (розкладання нафти спеціальними реагентами), 4) біологічний вплив (перетворення нафти спеціальними бактеріями) та ін. Автономна система ліквідації нафтових плям в такому вигляді без сумніву є кіберфізичною системою.

4. Автономна медична система протидії запаленню шлунку. Принцип дії: автономні медичні мікророботи потрапляють у шлунок, вимірюють рівень кислотності, виявляють місця запалення (по кольору, можливо по температурі), здійснюють впливи, які протидіють запаленню (наприклад, створюють хімічне середовище, яке зменшує кислотність). Автономна медична система протидії запаленню шлунку є прикладом кіберфізичної системи (можливо, її також можна розглядати як кібербіологічну систему).

5. Автономна медична система подавання наркозу з одночасним контролем стану пацієнта за допомогою енцефалограми головного мозку також є прикладом кіберфізичної системи.

3. Проблема інтегрування компонентів та автоматизації створення КФС

Важливою проблемою при створенні нових КФС є пошук шляхів використання вже існуючих компонент КФС широкого спектру застосування та існуючих архітектурних рішень побудови КФС. Для вирішення цієї проблеми доцільно розробляти та використовувати нові підходи до автоматизації створення та конфігурування КФС, в тому числі автономних адаптивних КФС, побудованих на основі принципів самоорганізації та децентралізованого управління [9].

Сценарій автоматизованого створення та конфігурування КФС може виглядати наступним чином. 1) Користувач (розробник) спілкується на природній мові з інтерфейсним агентом і формулює постановку задачі (дослідницька, виробнича, громадсько-соціальна). В ролі користувача також може виступати автономна система з елементами штучного інтелекту. 2) У відповідь на запит користувача в автоматичному режимі утворюється 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) В 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, вирішуючи поставлену користувачем задачу (надаючи відповідний сервіс іншим користувачам і т.п.). 6) По рішення користувача створена КФС додається у вигляді «шаблону проектування» до колекції (бібліотеки) типових рішень. 7) Створеною КФС (даним примірником або новоствореним іншим примірником) користуються інші користувачі та створюють свої варіанти КФС на основі нього.

Реалізація даного сценарію потребує уніфікації способів взаємодії компонентів КФС та побудови відповідних моделей інтегрування компонентів КФС в єдину систему. Для прикладу, на основі ідеї багаторівневої побудови КФС можна розглянути інтегрування компонентів КФС в двох аспектах (рис. 1): 1) горизонтальне інтегрування (h): в 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 – в тому розумінні, що компоненти, які інтегруються цим зв'язком, незалежні один від одного за рахунок деякого заданого рівня універсальності функціональних послуг та сервісів, які надають ці компоненти;
- 2) «сильний» зв'язок – в тому розумінні, що компоненти, які інтегруються цим зв'язком, максимально залежать один від одного з точки зору виконання покладених на них задач (і можливо по окремоті більше ні для чого не потрібні).

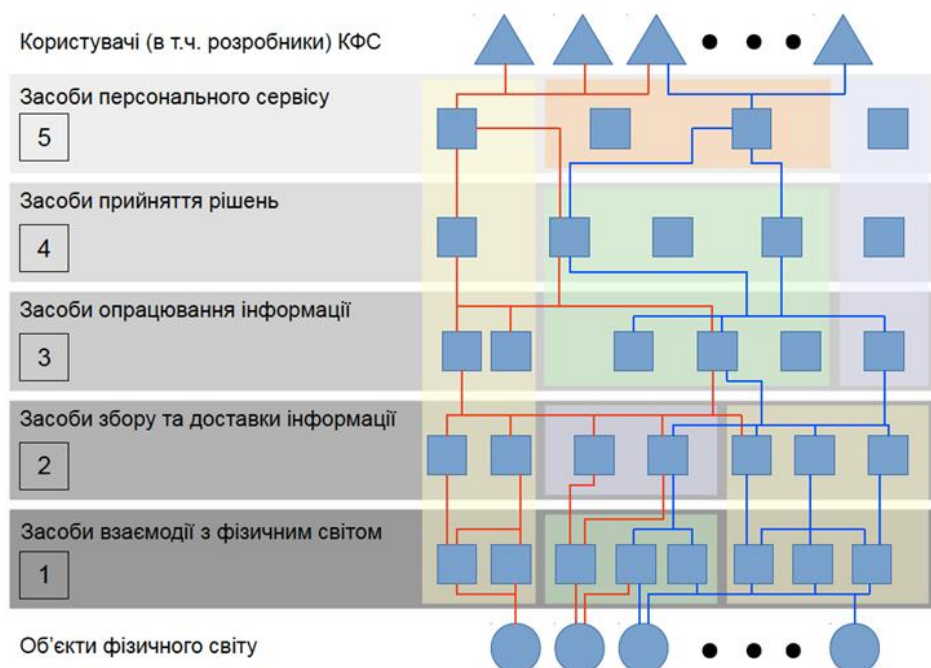


Рис. 1. Приклад інтегрування компонентів КФС в рамках ідеї багаторівневої побудови КФС

При цьому можна також піти в напрямку ускладнення поняття «сили-слабкості» зв'язків і відповідного збільшення типів зв'язків, виходячи з деякої змістовної інтерпретації їх призначення. Наприклад, на основі уніфікації базового інтерфейсу функціональної взаємодії компонент (протоколу взаємодії), він приймається як нижній рівень «слабкості» зв'язку (тобто як інтерфейс інтегрування найбільш універсальних 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 більш «сильним», тобто все більше взаємообумовлює роботу компонент, які він інтегрує (і таким чином компоненти тою ж мірою втрачають свою універсальність в контексті цього зв'язку). Відповідно максимально «сильний» зв'язок – це повна відсутність уніфікації інтерфейсу взаємодії (тобто «спеціалізований» зв'язок, який може забезпечити взаємодію тільки цих двох компонент і ніяких інших). В такий спосіб можна побудувати модель інтегрування, в якій «сила» (рівень) інтегрування Q будь-яких двох компонент (u, w) обумовлена ступенем їх універсальності, і є змінним параметром. Оскільки мова йде про структуру КФС (рис.1), то більш вигідно щоб це була дискретна величина, тобто рівень інтеграції $Q(u, w)$ приймав би значення з деякої множини $\{x_i\}$, $i=1, \dots, n$, де n – задана кількість рівнів інтегрування.

В найбільш простому варіанті моделі («слабкий» / «сильний» зв'язок) $n=2$, тобто $Q(u, w) = \{0, 1\}$, де 0 – кодує «слабкий» зв'язок, а 1 – кодує «сильний» зв'язок. Відповідно декартів добуток множини рівнів інтегрування та аспектів (напрямоків) інтегрування (h, v) дає всі можливі способи інтегрування:

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

В рамках цієї моделі можна визначити *кластер* сильно-зв'язаних компонент – як набір компонент, які пов'язані між собою лише зв'язками $u(h_1)w$ та $u(v_1)w$. Передбачається, що кластер сильно-зв'язаних компонент створюється для вирішення 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 $u(h_0)w$, $u(v_0)w$, що дає можливість іншим компонентам КФС користатись «послугами», які надає даний кластер. З цієї точки зору кластер сильно-зв'язаних компонент можна розглядати як додатковий «вимір» інтегрування компонентів КФС.

Розглянуту модель інтегрування також можна уточнити за рахунок розділення різних аспектів взаємодії компонент. Вище розглянуто лише аспект функціональної взаємодії (як основний з точки зору призначення КФС). До нього можна додати інші аспекти, наприклад, конструктивний (компоненти конструктивно рознесені чи знаходяться в одому чіпі, корпусі, приміщенні і т.д.), енергетичний (одна компонента живиться від джерела в іншій компоненті, чи в них власні джерела живлення і т.п.), телекомунікаційний (на основі обраної моделі інформаційної зв'язності компонент) і можливо інші. Відповідно для кожного з цих аспектів розглядаються свої власні рівні інтегрування $\{Q', Q'', \dots\}$, які накладаються на рівні інтегрування за іншими аспектами.

1. Винер Н. Кибернетика. – М.: Сов. радио, 1958. 2. Эшби У. Росс, Введение в Кибернетику. – М.: ИИЛ, 1959. 3. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А. Система розподілених контактних вимірювань на основі автономних мобільних інтелектуальних агентів // Вісник НУ «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі», 2001, № 437. – С.14-20. 4. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А. Автономні розподілені системи з елементами самоорганізації: проблеми та напрямки розвитку // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі», № 745, 2012. – С.26-32. 5. Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Кусьпісь О.П. Проблема організації

переміщення мобільного вимірювального агента у складі розподіленої системи автономних досліджень // *Вимірювальна техніка та метрологія*, 2007, № 67. – С.78-82. 6. Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Кусьнісь О.П. Аналіз способів організації переміщення мобільних вимірювальних агентів // *Вимірювальна техніка та метрологія*, 2008, № 69. – С.39-42. 7. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А. Способи організації переміщення мобільних вимірювальних агентів: підходи до побудови концептуальних моделей // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі»*, № 658, 2009. – С.15-20. 8. Jiafu Wan, Nehua Yan, Hui Suo, Fang Li, *Advances in Cyber-Physical Systems Research, KSII Transactions On Internet And Information Systems, VOL. 5, NO. 11, November 2011.* – pp.1891-1908. 9. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А. Використання технологій інтелектуального збору даних у кіберфізичних системах // *Матеріали Першого наукового семінару «Кіберфізичні системи: досягнення та виклики»*, НУЛП, Львів, 25-26 червня, 2015. – С.24-27

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