

САМОРЕКОНФІГУРОВНІ КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ ЯК МОДЕЛЬНА ОСНОВА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ САМООРГАНІЗАЦІЇ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

© Воробець Г.І., Тарасенко В.П., 2016

Запропоновано концептуальну модель опису, аналізу і синтезу кіберфізичних систем та вбудованих комп'ютерних засобів у таких системах як складної динамічної системи реального часу, що функціонує у фазовому просторі зі змінною вимірністю в умовах невизначеності. Обґрунтовано класифікаційні особливості та можливість застосування самореконфігурованих комп'ютерних засобів для інтелектуальної самоорганізації таких кіберфізичних систем.

A conceptual model description, analysis and synthesis of cyber-physical systems and embedded computer means in such systems as complex dynamic real-time systems, operating in phase space with variable dimension under uncertainty are proposed. Grounded classification features and possibility of self-reconfigurable computer tools for intellectual self-organization of cyber-physical systems.

Вступ

Сучасний науково-технічний напрямок «кіберфізичні системи» (КФС) [1, 2] сформувався приблизно десять років тому як окремих субнапрямок, метою якого стало дослідження та впровадження деяких можливостей кібернетики (широкого спектру обчислень, управління і передачі даних) для потреб природних та антропогенних фізичних систем, що функціонують у реальному часі [2]. Значних досягнень у становленні та розвитку КФС отримано завдяки потужним науковим програмам, які було започатковано у Європейському Союзі (проект «Сучасні дослідження і технології для вбудованих та інтелектуальних систем», 2004 р. – Advanced Research & Technology for Embedded and Intelligence Systems (ARTEMIS)) та США (проект «Інтеграція науки для кіберфізичних систем», 2006 р. – Science of Integration for CPSs) [3], що дозволило об'єднати в цьому субнапрямі потенціал провідних університетів (Берклі, Мемфісу, Мічигана та ін.) і дослідницьких та виробничих центрів (зокрема General Motors Research and Development Center). Проте, хоча підґрунтям для становлення КФС стали з одного боку розробки світового рівня у галузях мехатроніки, робототехніки, гнучких виробничих систем та систем автоматизованого управління технологічними процесами [4 – 8], а з іншого – розвиток мікропроцесорної та обчислювальної техніки, мережових і телекомунікаційних технологій, комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем, тощо, головним поштовхом для створення нової архітектури КФС [9 – 12] були досягнення технології мікро- і наноелектроніки у напрямку мініатюризації та мінімізації енергоспоживання інтегральних

компонент, які дозволили інтегрувати комп'ютерні засоби у фізичні об'єкти у вигляді вбудованих та розподілених систем.

Варто відзначити також, що з позицій загальної теорії управління і застосування її до машин і живої природи КФС є частковим випадком кібернетичних систем (КС) [13, 14]. Системи, синтезовані шляхом інтегрування комп'ютерних засобів у біологічні об'єкти слід розглядати як біологічно подібні (Bio-Inspired), або кібербіологічні системи (КБС) [15]. Прийнята термінологія, очевидно, є доцільною для підкреслення певних природничо-функціональних властивостей досліджуваних об'єктів, однак наразі немає загальноприйнятої класифікації КФС за структурно-логічними принципами їх побудови, архітектурою, функціональними параметрами і т. п., що ускладнює розробку загальних концепцій їх проектування. Крім того, з точки зору організації обробки інформації різного типу (аналогової, цифрової, відеопотоків, мережевого трафіку, тощо) вбудовані комп'ютерні засоби (ВКЗ) і спеціалізовані комп'ютерні системи (СКС) самі можна розглядати як складні КФС, які функціонують за своїми законами обробки інформації та управління, які є відмінними як від стандартних обчислювальних систем, телекомунікаційного обладнання, так і, зокрема, від робототехнічних, технологічних та інших КФС. Загальними особливостями різних типів КФС є [3]: обмеженість енергоспоживання та використовуваних апаратно-програмних ресурсів вбудованих систем; інтегрування арифметичної та логічної обробки даних в управління реальним фізичним процесом; розгалужена периферія і, часто, необхідність обміну інформацією через різні типи провідних і безпроводних інтерфейсів; реалізація інформаційно-вимірювальних каналів для контролю за технологічними процесами, та схем зворотного зв'язку для управління ними; необхідність масштабування системи для певних класів задач, чи динамічної реорганізації/реконфігурування та адаптування її архітектури до структури виконуваних алгоритмів, у тому числі й в умовах недостатньо визначених динамічно змінних параметрів контрольованих процесів. Вказані особливості для різних класів задач часто потребують певного рівня інтелектуальної самоорганізації системи, що можна забезпечити за допомогою її кібернетичної складової.

Метою даної роботи є обґрунтування загальних принципів класифікації КФС за властивостями їх адаптації до реалізовуваних функціональних алгоритмів, а також концепції синтезу самореконфігурованих комп'ютерних засобів (СРКЗ) як базових структур для інтелектуального динамічного самоаналізу функціональних станів КФС та її самоорганізації в умовах невизначеності певних параметрів і станів системи у режимі реального часу прийняття рішень.

1. Питання конфігуровності КФС та застосовуваних в них вбудованих і розподілених комп'ютерних засобів

Питання адаптації як процесу, чи адаптовності, як функціональної здатності пристосування системи до мінливості умов чи зовнішніх чинників її функціонування можна розглядати на кількох рівнях, у залежності від функціонально-структурної складності і досконалості самої системи. Як засіб реалізації адаптовності системи до зовнішніх збурень виступає структурно-функціональна чи конструкційна реконфігуровність системи. Окремо виділимо архітектурну реконфігуровність системи, оскільки для робототехніки даний термін визначає механічну складність системи і взаємозв'язки між ними, а для комп'ютерних засобів додатково характеризує типи і формат команд і даних та внутрішню машинну мову опису взаємодії між окремими модулями.

У загальному випадку під *конфігуровністю* розуміють здатність функціонально-структурної адаптації системи до реалізації (виконання) деякої множини елементарних

операцій, дій, чи більш складних функцій з заданого набору функціональних алгоритмів, що закладається під час проектування і реалізується у процесі налагоджування і запуску системи відповідними фахівцями.

Реконфігуровність – це здатність до багатократної мінливості і функціонально-структурної адаптації системи до заданого набору функціональних алгоритмів, яка реалізується у певні фіксовані моменти часу протягом життєвого циклу системи у процесі її експлуатації, що здійснюється операторами системи.

Динамічно конфігуровні/реконфігуровні системи – це такі системи, що володіють здатністю адаптації до умов функціонування у реальному часі, але моменти часу, в які відбувається їх функціонально-структурне конфігурування/реконфігурування залежать від попередньо заданих параметрів та/або логічних умов реалізовуваних алгоритмів. Що важливо – вказані умови і параметри чітко визначені на етапі програмування виконуваних алгоритмів. Такі системи володіють початковим ступенем (або задатками) до само організації, що також закладається на етапі проектування системи і є фактично аналогами засобів і пристроїв автоматичного регулювання та управління процесами і об'єктами.

Самоконфігуровність – є наступним (або II-им) рівнем самоорганізації системи і реалізується як здатність функціонально-структурної самоадаптації системи до вирішуваних задач та функціональних алгоритмів без впливу оператора, однак, як і в динамічних системах обмежується попередньо заданими значеннями вхідних параметрів задачі чи визначених логічних умов та заданим часом їх активування.

Самореконфігуровність є найвищим ступенем самоорганізації системи, яка після налагоджування, задання початкових параметрів та умов і запуску функціонує автономно, і здатна самостійно забезпечити в умовах недостатньої визначеності (або повної невизначеності чи прогнозованості поведінки у часі) вхідних параметрів, внутрішніх станів і впливів зовнішніх факторів в умовах реального часу.

У залежності від кола вирішуваних задач, їх складності, а також технічних умов щодо інтелектуального забезпечення обробки технологічної інформації (інформаційних сигналів) такі систем повинні мати різний рівень складності, а їх структурні рішення мають відрізнятися концепціями їх побудови, архітектури, функціонування. Проте, на відміну від попередніх 4-х випадків самореконфігуровні системи обов'язково містять додаткові апаратно-програмні засоби поглибленого самоаналізу системи (власних станів, вхідних сигналів, критичних та/або граничних значень функціональних параметрів, тощо). У найбільш досконалому вигляді, наприклад, вони володіють засобами штучного інтелекту для реалізації функцій самонавчання, та можуть використовувати, наприклад апарат нечіткої логіки для прийняття рішень у критичних умовах чи заданих режимах функціонування.

2. Опис СРКЗ КФС як динамічної комп'ютерної системи, що функціонує у фазовому просторі змінної вимірності

На відміну від типових обчислювальних систем СРКЗ володіють властивостями *спеціалізованості* (СП) та *мультифункціональності* (МФ) щодо вирішуваних у складі КФС типів і класів задач. МФ охоплює множину функцій для визначеного класу задач або проблемної орієнтації ВКЗ чи СКС. СП розглядається як апаратно-програмна пристосованість (адаптивність) системи для вирішення окремих типів задач окресленої проблеми. Між МФ і СП існує взаємно однозначна відповідність для відповідних класів задач чи проблем. Мультифункціональність СРКЗ є необхідною умовою для забезпечення працездатності

КФС і допускає паралельну реалізацію більшості функцій крім функції загального управління і синхронізації процесів.

Фазовими станами назвемо множини апаратно-програмних конфігурацій $K=\{k_i\}$ ВКЗ у певні моменти часу призначені для паралельного вирішення кількох типів задач вимірювання сигналів, обробки інформації, моделювання об'єктів і процесів, управління, тощо з повного множини виконуваних КФС функцій $F=\{f_i\}$, включаючи власні задачі СРКЗ як кіберкомпоненти КФС. Повній множині виконуваних функцій $F=\{f_i\}$ відповідають множини алгоритмів виконуваних програм $A=\{a_i\}$ та відповідних апаратних ресурсів $AR=\{r_i\}$. Повний набір фазових станів утворює фазовий простір $\Phi=\{\varphi_i\}$ в якому функціонує КФС. Вимірність фазового простору визначається кількістю паралельно виконуваних типів задач, тобто пропорційна конфігураційній розмірності фазових станів і може змінюватись у певні моменти часу в залежності від значень інформаційних параметрів системи. Автономне функціонування КФС (чи СРКЗ, як складової частини КФС) передбачає самоорганізацію системи у плані динамічного самореконфігурування її архітектури у фазовому просторі в залежності від зміни значень вхідних сигналів та параметрів станів системи у реальному часі. Для опису функціонування СРКЗ у складі КФС можливі різні, в тому числі і класичні підходи, широко представлені в літературі, наприклад метод графів, матричні методи та інші.

3. Концепція побудови самореконфігурованих комп'ютерних засобів і систем (СРКЗС) для КФС

Питання самореконфігурованості технічних засобів КФС в літературі розглядаються як спосіб реалізації самоорганізації системи шляхом конструктивної перебудови в першу чергу її механічних компонент. Повна самореконфігурованість як процес самоорганізації системи передбачає наявність у системі технічних можливостей для виконання конструктивних змін у структурі [4 – 6], функціях окремих модулів чи системи в цілому, корекції власної архітектури [7, 8, 10]. Такі можливості систем, робастних за принципами керованості, закладаються у процесі проектування КФС у вигляді застосування спеціальних шарнірних з'єднань, механічних приводів, комутаційних зчеплень, тощо, у залежності від призначення і виконуваних функцій системи. Система аналізу та управління механічною реконфігурованістю роботоподібних систем можна реалізувати на основі кіберкомпоненти КФС виключно на рівні програмного забезпечення ВКЗ чи СКС. Узагальнена модель описує ієрархію перетворення інформації в КФС у вигляді послідовної ланки: Configuration – Cognition – Cyber – Conversion – Connection (Конфігурування – Розпізнання – Комп'ютерна обробка – Перетворення – Підключення), що отримала назву «5С архітектури» [16 – 18].

Враховуючи відмінності архітектури, більш складною є самореконфігурованість ВКЗ і СКС як елементів структури КФС, оскільки реалізується шляхом синтезу функціональних спецпроцесорів з архітектурою, адаптованою до реалізовуваних алгоритмів і потребує схемотехнічної корекції окремих модулів системи [19 – 25]. Функціональна організація кіберкомпоненти КФС полягає у забезпеченні необхідного рівня *самоаналізу* системи в цілому та ВКЗ і СКС як локальної КФС, *самоадаптації* їх до умов зовнішнього оточення (у щонайширшому розумінні) та *самоорганізації* системи, як мультипроцесорного об'єкта. Для такої моделі стосовно кіберкомпоненти пропонується назва «3С-модель» (англ. – 3S-model : self-analysis, self-adaptation, self-organization). Варто зауважити, що на даний час процес синтезу спецпроцесорів потребує залучення кількох програмних продуктів, що не мають спільного інтерфейсу, і взаємодіють між собою на рівні оператора-розробника системи. У

цьому сенсі повної автономії системи у режимі самореконфігурування забезпечити поки-що неможливо. Актуальним є питання створення програмного забезпечення для наскрізного проектування конфігураційних файлів спецпроцесорів в одному програмному продукті. Наразі в літературі розглядаються питання можливості переходу від об'єктно-орієнтованого підходу до проектування таких систем до так званого подійно-орієнтованого підходу. На нашу думку перспективним у ближчому часі стане перехід до функціонально-орієнтованого проектування СКЗ і ВКЗ на основі програмованих логічних інтегральних середовищ (ПЛІС).

У найпростішому випадку загальна модель СРКЗ повинна містити 3 компоненти: модуль управління (МУ) системою з фіксованою організацією; аналітичний модуль (МА) контролю, аналізу і прийняття рішень; модуль реконфігуровного (МР) середовища з відповідним апаратно-програмним забезпеченням. Залежно від вирішуваних проблем чи класів задач та при доступних в даний час апаратно програмних ресурсах самореконфігуровність можна розглядати у наступних аспектах реалізації архітектури.

1. *Співпроцесорна* модель реалізації самореконфігуровного середовища. Суть його полягає в тому, що в програмованих середовищах, у залежності від вирішуваних проблем чи класів задач завантажується файл конфігурації “проблемного” співпроцесора (ПСПр) – виконувани функції чи задачі готуються як виконувани програмні файли на мові високого рівня або на спеціалізованій, для вибраного класу задач, мові, які у відповідності до рекомендацій МА завантажуються у ПСПр для виконання.

2. Модель повного *самореконфігурування з використанням бібліотеки файлів реконфігурації*. У цьому випадку аналітичний модуль в динамічному режимі приймає рішення про завантаження у реконфігуровне середовище одного або більше файлів апаратної конфігурації в залежності від вхідних умов та миттєвих станів системи, що мають місце в режимі реального часу функціонування системи.

3. *Мережева розподілена або серверна модель самореконфігурування* передбачає віддалену підготовку конфігураційних файлів для різних типів задач в реальному часі. Аналітичний модуль в динамічному режимі формує запит на синтез файлу реконфігурації чи множини таких файлів, необхідних для подальшого функціонування системи при вирішуванні нових задач чи проблем, що виникли на попередньому етапі. Сформований запит транслюється для задачі синтезу реконфігурованих файлів. Залежно від типу системи синтез можна реалізувати засобами розподіленої системи, що містить окремі модулі синтезу доступні в мережі, або на віддаленому сервері.

Систему, що описується моделлю повного *самореконфігурування на основі синтезу нових файлів реконфігурації засобами СРКЗ* відповідно до нових вимог, що генеруються аналітичним модулем на основі вхідних даних та станів системи в режимі реального часу можна назвати інтелектуальною комп'ютерною системою з самореконфігурацією.

Висновки

Таким чином, головною відмінністю моделі самореконфігурованих систем від конфігурованих систем інших типів є їх аналітично-інтелектуальне наповнення з точки зору обсягів аналізу інформації, наявності засобів моделювання і прогнозування поведінки системи та розширених можливостей корекції власної архітектури як функціонально-структурної організації системи для підвищення її надійності та ефективної продуктивності. СРКЗ і КФС загалом можна описати концептуальною моделлю складної динамічної системи, що функціонує у фазовому просторі зі змінною вимірністю. Для аналізу і синтезу таких

систем перспективним є перехід від об'єктно-орієнтованого до функційно-орієнтованого проектування та створення відповідного програмного забезпечення.

1. *Cyber-physical system* – [Електронний ресурс], режим доступу – <http://cyberphysicalsystems.org/>.
2. Edward A. Lee *Cyber-Physical Systems – Are Computing Foundations Adequate?* / *Position Paper for NSF Workshop On Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap October 16 – 17, 2006 Austin, TX.* – [Електронний ресурс], режим доступу – <http://ptolemy.eecs.berkeley.edu/publications/papers/06/CPSPPositionPaper/>
3. Jiafu Wan; Hehua Yan; Hui Suo; Fang Li *Advances in Cyber-Physical Systems Research.* // *KSII Transactions on Internet & Information Systems.* Nov2011, Vol. 5 Issue 11, p1891-1908. – [Електронний ресурс], режим доступу – <http://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE01811942>.
4. A 3-D Self-Reconfigurable Structure / Satoshi Murata*, Haruhisa Kurokawa, Eiichi Yoshida, Kohji Tomita and Shigeru Kokaji // *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Year: 1998, Volume: 1 Pages: 432 – 439 vol.1, DOI: 10.1109/ROBOT.1998.677012.* – [Електронний ресурс], режим доступу – <http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=A%203-D%20Self-Reconfigurable%20Structure>.
5. H. Kurokawa; S. Murata; E. Yoshida; K. Tomita; S. Kokaji. *A 3-D self-reconfigurable structure and experiments* // *Intelligent Robots and Systems, 1998. Proceedings., 1998 IEEE/RSJ International Conference on Year: 1998, Volume: 2. Pages: 860 – 865 vol.2, DOI: 10.1109/IROS.1998.727308.*
6. Josef Kadlec; at all. *Modular system of converters with interleaved structure* / Josef Kadlec; Radoslav Cipin; Dalibor Cervinka; Jan Knobloch; Petr Prochazka; Ivo Pazdera // *Mechatronics – Mechatronika (ME), 2014 16th International Conference on Year: 2014 Pages: 146 – 151, DOI: 10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018250.*
7. *Self-reconfiguring modular robot.* – [Електронний ресурс], режим доступу – https://en.wikipedia.org/wiki/Self-reconfiguring_modular_robot.
8. *Self-reconfigurable control architecture for complex mobile robots.* / Jan Frost¹ / Walter Stechele² / Erik Maehle // *Citation Information: it – Information Technology. Vol. 57, Issue 2, PP. 122–129, ISSN* [Електронний ресурс], режим доступу – [http://www.degruyter.com/dg/viewarticle/j\\$002fitit.2015.57.issue-2\\$002fitit-2014-1063\\$002fitit-2014-1063.xml](http://www.degruyter.com/dg/viewarticle/j$002fitit.2015.57.issue-2$002fitit-2014-1063$002fitit-2014-1063.xml).
9. Paulo Tabuada. *Cyber-Physical Systems: Position Paper.* // – [Електронний ресурс], режим доступу – https://www.researchgate.net/publication/266351481_Cyber-Physical_Systems_Position_Paper.
10. Gopal Raghav, Swaminathan Gopalswamy. *Architecture Driven Development for Cyber-Physical Systems* – [Електронний ресурс], режим доступу – https://wiki.sei.cmu.edu/aadl/images/5/5c/SAEAerotech2009_Emmeskaay.pdf.
11. Belgacem Ben Hedia, Etienne Hamelin, Chokri Mraidha, Sara Tucci Piergiovanni. *Model-compilation challenges [for Cyber-Physical systems (CPS)]* – [Електронний ресурс], режим доступу – <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01292315/document>.
12. *Big future for cyber-physical manufacturing systems.* September 23, 2015 *Editor Design World by Behrad Bagheri, NSF I/UCRC for Intelligent Maintenance Systems (IMS) and Jay Lee, University of Cincinnati.* – [Електронний ресурс], режим доступу – <http://www.designworldonline.com/big-future-for-cyber-physical-manufacturing-systems/>.
13. Wiener Norbert. *Cybernetics or control and communication in the animal and machine.* / *Second edition.* – New York – London, 1961. – 231 p. – [Електронний ресурс], режим доступу – http://uberty.org/wp-content/uploads/2015/07/Norbert_Wiener_Cybernetics.pdf.
14. Глушков В.М. *Введение в кибернетику.* К.: Изд-во Академии наук УССР, 1964. – 324 с.
15. *Bio-Inspired Models of Network, Information, and Computing Systems: 6th International ICST Conference, BIONETICS 2011, York, UK, December 5-6, 2011, Revised Selected Papers* // Vol. 103. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering* / Editors: Emma Hart, Jonathan Timmis, Paul Mitchell, Tadashi Nakano, Foad Dabri. Springer, 2012. – 259 p. – ISBN 3642327117, 9783642327117.
16. *5C model of CPS architecture.* – [Електронний ресурс], режим доступу – https://en.wikipedia.org/wiki/Cyber-physical_system.
17. Jay Lee, Behrad Bagheri, Hung-An Kao. *A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems* – [Електронний ресурс], режим доступу – <http://wenku.baidu.com/view/9fa73ebb5901020207409cf8.html>.
18. Behrad Bagheri, Shanhu Yang, Hung-An Kao, Jay Lee. *Cyber-physical Systems Architecture for Self-Aware Machines in Industry 4.0 Environment* //

IFAC-PapersOnLine 48-3 (2015) 1622–1627. 19. Мельник В.А. Основи побудови та організації функціонування реконфігурованих комп'ютерних систем // Вісник Хмельницького національного університету № 6 '2012 – С.212-217. 20. Palagin A. V., Oranasenko V. N. Reconfigurable-computing technology. // *Cybernetics and Systems Analysis* September 2007, Volume 43, Issue 5, pp 675-686. 21. Мельник В.А., Сарайрех З. Самоконфігуровні апаратні прискорювачі обчислень в комп'ютерах // Вісник національного університету “Львівська політехніка” Комп'ютерні системи та мережі. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. – No 688. – С. 162-170. 22. Self-reconfiguring System-on-Chip using Linux on a Virtex-5 FPGA / Diplomarbeit //zur Erlangung des akademischen Grades Diplominformatiker –107 p. 23. Dynamically Reconfigurable Coprocessors in FPGA-based Embedded Systems / Student: Ivan Gonzalez // Ph.D. Thesis March, 2006. 24. Dynamically reconfigurable bio-inspired hardware / Andres Emilio UPEGUI POSADA Lausanne, EPFL 2006 -205p. 25. Enabling Self-Organization in Embedded Systems with Reconfigurable Hardware / Christophe Bobda, Kevin Cheng, Felix Mühlbauer, Klaus Drechsler, Jan Schulte, Dominik Murr, and Camel Tanougast // Hindawi Publishing Corporation *International Journal of Reconfigurable Computing* Volume 2009, Article ID 161458, PP.1-9. doi:10.1155/2009/161458.