

Systems, Springer, 2012. – 170 p. 17. Бочкаръов О.Ю., Голембо В. А. Самоорганізація автономних розподілених систем в задачах прийняття рішень в умовах невизначеності // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп’ютерні системи та мережі”. – 2010. – № 688. – С. 23–30 18. Dariusz Uciński. *Measurement Optimization for Parameter Estimation in Distributed Systems* // Technical University Press, Zielona Góra, 1999. 19. Botchkaryov A., Kovela S. *Concept of Multi-agent Conditional Interplay* // In Proceedings of EUROSIM/UKSim 10th International Conference on Modelling and Simulation, Cambridge, England, 1–3 April, 2008. – P. 100–105 20. Botchkaryov A., Kovela S. *A new approach to coordinate multi-agent interaction and decision making* // Матеріали 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси”(ІРТК-2011), Київ, 23-25 травня, 2011. – С. 272–275. 21. Растрюгин Л.А., Рупа К.К., Тарасенко Г.С. *Адаптація випадкового пошуку.* – Рига: Зинатне, 1978. – 239 с.

УДК 681.3; 004.3

О.Ю. Бочкаръов, В.А. Голембо

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних обчислювальних машин

АВТОНОМНІ РОЗПОДІЛЕНІ СИСТЕМИ З ЕЛЕМЕНТАМИ САМООРГАНІЗАЦІЇ: ПРОБЛЕМИ ТА НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ

© Бочкаръов О.Ю., Голембо В.А., 2012

Розглянуто проблеми побудови та напрями вдосконалення автономних розподілених систем з елементами самоорганізації, відповідно до сучасних концепцій розвитку інформаційних технологій та обчислювальної техніки.

Ключові слова: автономна розподілена система, кіберфізична система, адаптація, самоорганізація.

The problems of development and improvement of autonomous distributed system with elements of self-organization based on modern concepts of progress of information technologies and computer techniques are considered.

Key words: autonomous distributed system, cyber-physical system, adaptation, self-organization.

Вступ

Масштаби застосування автономних розподілених систем (АРС) останнім часом швидко збільшуються. Вирішальними чинниками, які обумовлюють цей процес, є різке зростання обчислювальних та комунікаційних можливостей сучасних обчислювальних засобів та перехід до моделей мобільних обчислень, в яких окремих обчислювальний вузол безпроводної комп’ютерної мережі може переміщуватись у просторі. При цьому зберігається тенденція збільшення автономності розподілених систем за рахунок передачі їм суттєвої частини повноважень у прийнятті рішень як в області практичних задач, які розв’язують ці АРС, так і в області оптимізації та забезпечення надійності роботи самих АРС. Крім того, розподіленість таких систем у просторі унеможливує здебільшого використання класичних централізованих схем управління та організації їх роботи, потребуючи пошуку відповідних децентралізованих рішень [1]. Одним з найперспективніших напрямів вирішення проблем, пов’язаних зі зростанням автономності та забезпеченням децентралізованого управління АРС, є використання принципів самоорганізації та адаптації [1–5]. Відповідно АРС з елементами самоорганізації все частіше використовуються для розв’язання багатьох прикладних задач у сфері наукових досліджень, сфері інформаційних технологій, в промисловості та в області військових застосувань. Відтак в роботі розглянуто актуальне питання розв’язання проблем, які виникають під час розроблення та організації функціонування АРС з елементами самоорганізації.

Стан проблеми

Базовий сценарій використання АРС передбачає початкове розміщення системи у цільовому середовищі (task environment) у вигляді множини автономних вузлів АРС, поєднаних каналами зв'язку відповідно до реалізованої моделі інформаційної взаємодії, після чого починається довготермінова взаємодія АРС з середовищем без участі людини-оператора, в процесі якої АРС самостійно виконує поставлені перед нею завдання. В процесі роботи АРС можуть виникати виключні ситуації зовнішньої природи (непередбачувані зміни у цільовому середовищі; збурення фізичних процесів середовища, які заважають роботі АРС; поява нових чинників, які впливають на процеси середовища тощо) та внутрішньої природи (тимчасова або постійна відмова окремих вузлів АРС, втрата зв'язку між деякими вузлами АРС, введення в роботу нових додаткових вузлів тощо). Відповідно метою застосування принципів самоорганізації та адаптації у роботі АРС є: 1) забезпечення можливості пристосування до зазначених виключних ситуацій (і, по можливості, використання їх на свою користь); та 2) забезпечення процесу поступової оптимізації роботи АРС у звичайних режимах роботи.

Основні елементи наведеного базового сценарію використання АРС можна знайти в багатьох сучасних концепціях розвитку інформаційних технологій та обчислювальної техніки. Наприклад, в концепції проактивних комп'ютерних систем (pro-active computer systems) [6] та спорідненій з нею концепції автономних обчислень (Autonomic computing) [7–9], які запропонували та розвивають дослідницькі підрозділи фірми ІВМ, передбачено делегування автономним програмним агентам істотної частини повноважень у прийнятті рішень щодо поточної оптимізації розподілених обчислювальних систем та забезпечення їх надійної захищеної роботи. Ще одним важливим прикладом розвитку ідей автономності та децентралізації є концепція кіберфізичних систем. Під кіберфізичною системою розуміють поєднання фізичних процесів та кібернетичних компонент [10–12], які забезпечують збір та попередню обробку вимірювальної інформації, організацію вимірювально-обчислювальних процесів, захищене зберігання та обмін вимірювальною і службовою інформацією, організацію та здійснення впливів на фізичні процеси. Об'єднання цих компонент у межах єдиної системи дає змогу отримувати якісно нові результати, які можна широко використовувати для побудови автономних розподілених систем. Спираючись на концепцію кіберфізичних систем, провідні наукові установи та групи у всьому світі спрямовують свої зусилля на пошук нових напрямів розвитку інформаційно-обчислювальних технологій, об'єднуючи та інтегруючи різні за призначенням підсистеми у єдину децентралізовану та гнучку систему. В 2012 р. кіберфізичні системи, як напрям досліджень, Національний науковий фонд (National Science Foundation) США визначив ключовим напрямом наукових досліджень. Одним з основних попередників цього напрямку можна вважати концепцію SmartDust (безпроводної мережі сенсорних, обчислювальних та виконавчих вузлів, об'єднаних у гнучку масштабовану систему) [13], що запропонували науковці Університету Каліфорнії (Берклі) та вибрало як один з перспективних напрямів розробок Агентство передових оборонних дослідницьких проєктів США (DARPA). Також слід відзначити наукові роботи на основі концепцій повсюдних обчислень (ubiquitous computing) [14] та концепції оточуючого інтелекту (ambient intelligence) [15], в яких досліджуються проблеми організації великої кількості автономних вбудованих вимірювально-обчислювальних вузлів, об'єднаних інформаційними зв'язками у єдину систему. Подальший розвиток цих робіт призвів до виникнення концепції “Інтернету речей” (Internet of Things) [16], яка передбачає наявність фізичних об'єктів у глобальній мережі як вузлів, від яких можна отримувати інформацію та віддавати їм команди. Аналіз зазначених концепцій та науково-технічних напрямів підтверджує велику перспективу ідей та принципів, покладених в основу побудови та функціонування автономних розподілених систем. Складні завдання, які ставляться перед АРС у межах цих концепцій, потребують дослідження та застосування методів адаптації та самоорганізації як одного з невід'ємних напрямів розвитку інформаційних технологій та обчислювальної техніки.

Постановка задачі

Розглянути проблему побудови та напрями вдосконалення автономних розподілених систем з елементами самоорганізації, відповідно до сучасних концепцій розвитку інформаційних технологій та обчислювальної техніки.

Розв'язання задачі

На підставі аналізу сучасних концепцій розвитку інформаційних технологій і обчислювальної техніки та останніх досягнень в області обчислювальних та комунікаційних засобів можна відзначити такі загальні тенденції:

1. Зростання складності інформаційно-обчислювальних систем (зокрема за рахунок різкого збільшення кількості мобільних обчислювальних пристроїв, що входять до їх складу) призводить до збільшення недетермінованої складової у їхній роботі. У випадку APC відповідна складність їх внутрішньої організації (“внутрішнє середовище”) стає джерелом невизначеності під час розв'язання оптимізаційних задач та задач забезпечення їх надійної та захищеної роботи.

2. Збільшення обсягів взаємодії сучасних комп'ютерних систем з фізичними процесами, що розгортаються в навколишньому середовищі (природному та техногенному) та, як правило, характеризуються істотною часткою недетермінованості у часі та просторі. У випадку APC це відображається у складності моделі зовнішнього цільового середовища, в якому розміщується APC і в якому вона виконує поставлені перед нею завдання.

3. Збільшення масштабів використання комп'ютерних та комунікаційних засобів людиною, що породжує специфічний тип невизначеності щодо подальших дій користувачів у процесі інтерактивної взаємодії з інформаційно-обчислювальними системами. У випадку APC це відображається у часткову невизначеність щодо вхідного потоку завдань з боку користувача (або декількох користувачів), що потребує використання складних моделей поведінки окремого користувача та моделей колективної поведінки користувачів.

Отже, в більшості варіантів застосування APC передбачається наявність невизначеності (нестачі інформації) в процесах прийняття рішень у межах повноважень, які делегує APC людина. При формулюванні та пошуку рішень відповідних задач конструктивно та функціонально автономний вузол APC отримав назву “автономний агент” [1–5]. Автономний агент – це створена штучно автономна реальна або віртуальна сутність (сукупність апаратних і програмних засобів), яка спроможна виконувати самостійні цілеспрямовані активні дії у складі колективу або індивідуально в інтересах власника (розробника) або користувача. Спираючись на це визначення автономного агента, можна навести попереднє визначення самоорганізації. Самоорганізація – це процес впорядкування (спосіб збільшення порядку, спосіб збільшення негентропії) за простором, часом, і за параметром(ами) шляхом встановлення взаємозв'язку та взаємодії первинно неупорядкованої підмножини сутностей (агентів) з метою створення:

- системи (багатоагентної системи), функціональні можливості якої перевищують суму можливостей окремих сутностей (агентів), що входять до її складу;
- системи, яка здатна адаптуватись до впливів зовнішнього середовища, змінивши свої функції та структури;
- системи, яка здатна підтримувати свій гомеостазис та життєдіяльність у разі недетермінованих змін зовнішнього середовища.
- системи, яка здатна виявляти неоднорідності речовини та енергії у просторі та часі.

Завдяки цьому досягається вищий, якісно новий рівень можливостей щодо виконання системою поставлених перед нею власником або сформованих нею самою завдань у сфері практичної діяльності. Зауважимо, що самоорганізація як процес і як результат не може розглядатись як властивість будь-якої повністю централізованої системи. Можна висунути гіпотезу, що самоорганізація досягається за відсутності будь-яких механізмів централізованого управління, тоді як централізовані системи породжують лише централізовану організацію як процес і як результат.

Наведене вище визначення самоорганізації ми використовували в держбюджетних науково-дослідних роботах “Розробка нових принципів побудови ВОМ з елементами самоорганізації для екологічного моніторингу” (ДБ17.ЕС, 2000–2001), “Інтелектуальні реконфігуровані нарощувані ВОМ екологічного моніторингу: принципи структурної самоорганізації та функціонування” (ДБ/17.Мель, 2002–2003), “Конфігуровані вимірально-обчислювальні мережі інтелектуальних автономних агентів для вирішення задач моніторингу навколишнього середовища” (ДБ/АВАГ, 2004–2006) [2–5].

Відповідно до принципів структурної адаптації [17] можна також дати визначення системи, що самоорганізується. Система, що самоорганізується, – це система, здатна цілеспрямовано змінювати свою структуру та алгоритм роботи для: 1) пошуку та забезпечення виникнення нових функціональних можливостей за рахунок синергетичного ефекту від взаємодоповнення елементів (вузлів) системи; 2) адаптації до змін у зовнішньому середовищі або об'єкті управління; 3) адаптації до впливів з боку зовнішнього середовища та до змін цілей (задач), які ставить перед системою користувач.

Окремо зауважимо, що складність проблеми побудови та організації роботи АРС з елементами самоорганізації безпосередньо обумовлена складністю цільового середовища, з яким взаємодіє АРС, виконуючи поставлені перед нею завдання. Відтак складність моделі середовища визначає складність процесів прийняття рішень, які мають бути реалізовані у АРС [1]. Тому питання класифікації та побудови моделей середовища в області розробки АРС з елементами самоорганізації є особливо актуальним. При цьому можна виділити два основних напрями класифікації: 1) за природою середовища; 2) за характеристиками середовища.

У межах першого напрямку класифікації розрізняються фізичне (реальне) середовище, віртуальне середовище та середовище доповненої реальності (augmented reality). Крім цього, в задачах оптимізації роботи обчислювальних та програмних систем розглядають також операційне середовище та мережеве середовище. В області дослідження та побудови мобільних роботизованих автономних агентів розрізняють наземне середовище, підземне середовище, повітряне середовище, підводне середовище, надводне середовище (як границю водного та повітряного), придонне середовище (як границю наземного та підводного) та космічне середовище. Також із загальніших позицій типізації можна розрізнити фізичне, біологічне та суспільне середовище.

У межах другого напрямку класифікації розглядають різні набори характеристик середовища, які безпосередньо впливають на складність відповідних процесів прийняття рішень. Прикладом цього набору є така множина класифікаційних ознак цільового середовища [18]: доступне / недоступне (для спостереження), детерміноване / недетерміноване, епізодичне / не епізодичне, статичне / динамічне, дискретне / неперервне. У цьому випадку кожна класифікаційна ознака визначає окремий аспект “простоти” та “складності” середовища. Іншим поширеним варіантом є класифікація середовищ згідно з параметрами математичної моделі, яка використовується для розроблення алгоритмів роботи АРС. До них, наприклад, належать такі моделі ймовірнісних характеристик середовища (за зростанням складності): стаціонарне випадкове середовище [19, 20], випадкове середовище з перемиканням станів [19, 20], марковський процес прийняття рішень [21, 22], марковський процес прийняття рішень з частковою доступністю для спостережень [21, 22] тощо.

Загалом проблема узагальненого уніфікованого опису цільового середовища і відповідної класифікації рівнів його складності лишається відкритою, що потребує подальших досліджень.

Іншим важливим аспектом проблеми побудови та організації роботи АРС з елементами самоорганізації є моделювання та класифікація можливостей АРС, за характером її взаємодії з середовищем та способом організації її роботи. З цього погляду можна запропонувати класифікацію АРС на основі таких класифікаційних ознак.

1. За можливістю переміщення вузлів АРС (автономних агентів) у просторі цільового середовища можна розрізнити нерухомі ($m = 0$) вузли та мобільні ($m = 1$) вузли АРС. При цьому можна розглядати і складніші моделі переміщення автономних агентів [23].

2. За характером розміщення вузлів АРС у просторі цільового середовища можна розрізнити територіально зосереджені ($d = 0$) та територіально розподілені ($d = 1$) АРС. У цьому випадку також можна розглядати гнучкіші оцінки неоднорідності розташування автономних агентів у просторі.

3. За способом організації процесів прийняття рішень та управління можна розрізнити централізовані ($u = 0$) та децентралізовані ($u = 1$) АРС. Складнішим варіантом може бути застосування моделі, яка окрім повністю централізованої та повністю децентралізованої схеми, задає також проміжні варіанти комбінації обох схем управління у різних пропорціях.

4. За способом впливу АРС на цільове середовище можна розрізнити АРС зі статичними нерухомими ($e = 0$) органами впливу на середовище (приклад: система нагрівання та охолодження

повітря) та APC з динамічними рухомими ($e = 1$) органами впливу на середовище (приклад: робототехнічний маніпулятор для збирання проб).

5. За можливостями впливу APC на цільове середовище можна розрізняти APC, які не трансформують (не змінюють) ($r = 0$) цільове середовище, та APC, які трансформують (змінюють) ($r = 1$) цільове середовище своїми діями. Додатково трансформувальні впливи можуть класифікуватись як оборотні та необоротні.

Окремо зауважимо, що внаслідок взаємодії APC з цільовим середовищем в будь-якому випадку в середовище вносяться зміни, зумовлені “втручанням” APC. При цьому, згідно з конкретною постановкою задачі, приймається рішення про те, чи враховувати ці зміни як ключовий елемент задачі, чи розглядати їх як “паразитні”, чи взагалі нехтувати ними.

Відповідно до запропонованої класифікації можна сформулювати 32 варіанти APC з погляду взаємодії APC з середовищем та способом їх внутрішньої організації. При цьому кожному варіанту $\{m, d, u, e, r\}$ можна поставити у відповідність деякий узагальнювальний показник складності розробки та побудови APC, формування якого може бути предметом подальших досліджень. Треба також відзначити актуальність проблеми розробки та застосування протоколу самоідентифікації типів окремих вузлів (автономних агентів) та APC загалом [7–9], що дозволить реалізувати складні сценарії оптимізації роботи, структурної адаптації та масштабування таких систем. Запропоновану класифікацію можна використати як основу для створення такого протоколу для APC з елементами самоорганізації, в якій автономні агенти будуть “знати” свої можливості та, за потреби, повідомляти про них інших агентів.

Проблематика APC з елементами самоорганізації. До основних проблем побудови та організації роботи APC можна зарахувати такі проблеми.

1. Проблема забезпечення синергії (властивості функціональної емерджентності) при поєднанні автономних агентів в єдину APC. Для вирішення цієї проблеми потрібно забезпечити умови, за яких проявляються різні варіанти взаємодоповнення елементів системи, та організувати цілеспрямований пошук на множині відповідних станів системи.

2. Проблема забезпечення спільного (одночасного) розвитку середовища та APC (згідно з принципом налаштування інструмента дослідження під об'єкт дослідження [2–5]). Із загальнішої позиції можна розглядати адаптацію процесу саморозвитку APC до синергетичних процесів, що розгортаються в цільовому середовищі.

3. Проблема оперативності управління [2–5], яка полягає у неможливості повністю централізованого управління APC та вимагає пошуку відповідних децентралізованих схем та способів управління. У ширшому аспекті ця проблема вкладається в актуальну тенденцію дослідження та використання ресурсу децентралізованого управління.

4. Проблема пошуку оптимального співвідношення між швидкістю прийняття рішень в APC та їх якістю (точністю) з погляду вибраного критерію якості роботи APC. При цьому якість (точність) рішень, як правило, визначається складністю моделі середовища, яка реалізована та використовується в APC. Для вирішення цієї проблеми доцільно використовувати принципи адаптивного управління (зокрема дуального управління) та концепцію адаптивних моделей [24].

5. Проблема розробки та реалізації ієрархії складності алгоритмів поведінки автономних агентів у складі APC (відповідно до ієрархії складності відповідних задач). Вирішення цієї проблеми передбачає використання принципу розбиття задачі на підзадачі та пошуку функціонально повного набору базових (службових) алгоритмів на всіх рівнях ієрархії [1].

6. Проблема автономного пошуку такого рівня складності внутрішньої організації APC, який найкраще відповідає складності цільового середовища, з яким взаємодіє APC (проблема адаптації рівня складності APC до складності середовища або розв'язуваної задачі). При цьому передбачається можливість спрощення та ускладнення механізмів функціонування APC під час її роботи. Також, оскільки більша складність потребує більших обчислювальних та комунікаційних ресурсів, можна розглядати процес спрощення/ускладнення механізмів функціонування APC як розв'язання задачі оптимізації відповідних витрат.

7. Проблема дослідження цільового середовища та побудови його моделі автономною розподіленою системою. Вирішення цієї проблеми передбачає застосування відповідних класичних методів (ідентифікація систем тощо), методів машинного навчання (machine learning) та методів формування і перевірки гіпотез про найкращу за низкою критеріїв модель середовища (теорія планування експериментів).

Напрями розвитку АРС з елементами самоорганізації. До основних напрямів розвитку АРС з елементами самоорганізації та розв'язання відповідних дослідницьких задач можна зарахувати такі напрями.

1. Розвиток та застосування методів машинного навчання, зокрема методів навчання з підкріпленням (reinforcement learning) та методів навчання без вчителя (unsupervised learning). На особливу увагу в межах цього напрямку заслуговують методи та алгоритми навчання з підкріпленням у багатоагентних системах [22], серед яких методи навчання найкращим способом організації колективних дій автономних агентів (як вузлів АРС). Також перспективним є дослідження та застосування методів навчання без вчителя для пошуку нових закономірностей у процесах цільового середовища та пошуку способів використання цих закономірностей для покращення роботи АРС.

2. Дослідження та використання технології багатоагентних систем (multi-agent systems), зокрема способів самоорганізації механізмів ігрової координації спільних колективних дій автономних агентів (як вузлів АРС). Відповідно, на особливу увагу серед технологій багатоагентних систем заслуговують методи пошуку найефективніших механізмів ігрової координації спільних колективних дій автономних агентів, розроблення нових архітектур інтелектуальних автономних агентів та відповідних способів їх взаємодії і координації спільних узгоджених дій [25].

3. Використання методів наукового напрямку “Інтелект рою” (swarm intelligence) [26,27], у межах якого відбувається пошук та дослідження природних аналогів самоорганізації у біологічних системах (наприклад, мурашині алгоритми) з їх подальшим використанням в АРС. На особливу увагу в межах цього напрямку заслуговують способи координації спільної поведінки простих агентів на основі тимчасових міток, які вони залишають у точках координаційного простору [28].

4. Дослідження та використання методів параметричної адаптації, зокрема широкого класу оптимізаційних задач, розв'язання яких автоматизується і виконується під час роботи АРС. Важливо забезпечити можливість інкрементної оптимізації роботи АРС у міру збільшення інформації про цільове середовище, яка здобувається одночасно з процесом оптимізації.

5. Дослідження та використання методів структурної адаптації [1, 17], зокрема методів пошуку оптимальної динамічної структури взаємопідпорядкування автономних агентів (як вузлів АРС), методів пошуку оптимального рівня та розподілу функціональної неоднорідності серед автономних агентів та методів пошуку оптимального рівня структурної інтегрованості окремого автономного агента в АРС. При цьому можна висунути гіпотезу, що методи структурної адаптації значно переважають за можливостями методи параметричної адаптації, але і потребують складніших алгоритмів для реалізації.

Висновки

У роботі розглянуто проблему побудови та напрями вдосконалення автономних розподілених систем з елементами самоорганізації з урахуванням сучасних концепцій розвитку інформаційних технологій та обчислювальної техніки. Запропоновано визначення автономного агента (вузла АРС), процесу самоорганізації та системи, що самоорганізується. Наведено класифікації цільового середовища та типів АРС, за характером її взаємодії з середовищем та способом організації її роботи. Розглянуто проблематику АРС з елементами самоорганізації та основні напрями розвитку АРС з елементами самоорганізації.

1. Бочкарьов О.Ю., Голембо В. А. Самоорганізація автономних розподілених систем в задачах прийняття рішень в умовах невизначеності // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп’ютерні системи та мережі”. – 2010. – № 688. – С. 23–30.

2. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А. Система розподілених контактних вимірювань на основі

автономних мобільних інтелектуальних агентів // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп’ютерні системи та мережі”. – 2001. – № 437. – С. 14–20. 3. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А. Моделі колективної поведінки вимірювальних агентів // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп’ютерні системи та мережі”. – 2002. – № 463. – С. 19–27. 4. Мельник А.О., Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю. Нові принципи побудови вимірювально-обчислювальних мереж на основі інтелектуальних агентів // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп’ютерні системи та мережі”. – 2003. – № 492. – С. 100–107. 5. Бочкарёв А.Ю., Голембо В.А. Самоорганизация коллектива мобильных измерительных агентов в задаче распределенных контактных измерений // Искусственный интеллект, Донецк, №3, 2005. – С. 723–731. 6. Want R., Pering T., Tennenhouse D., Comparing autonomic and proactive computing. *IBM Systems Journal*, Vol. 42, No.1, 2003. – pp.129–135. 7. Horn P., *Autonomic Computing: IBM's Perspective on the State of Information Technology*, October 15, 2001. 8. Richard Murch, *Autonomic Computing*, IBM Press, 2004. – 336 p. 9. Kephart J., Chess D., *The Vision of Autonomic Computing*, *IEEE Computer* 36(1), 2003. – pp.41-50. 10. Edward Lee, *Cyber Physical Systems: Design Challenges*. University of California, Berkeley Technical Report No. UCB/EECS-2008-86, January 23, 2008. 11. Jules White et al. R&D challenges and solutions for mobile cyber-physical applications and supporting Internet services, *Journal of Internet Services and Applications*, Volume 1, Number 1, May 2010. – pp. 45-56. 12. Jiafu Wan, Hehua Yan, Hui Suo, Fang Li, *Advances in Cyber-Physical Systems Research*, *KSII Transactions On Internet And Information Systems*, VOL. 5, NO. 11, November 2011. – pp.1891-1908. 13. Mohammad Ilyas, Imad Mahgoub, *Smart Dust: Sensor Network Applications, Architecture, and Design*, CRC Press, 2006. – 352 p. 14. Stefan Poslad, *Ubiquitous Computing: Smart Devices, Environments and Interactions*, Wiley, 2009. – 473 p. 15. *Ambient Intelligence*, Werner Weber et al. (Eds.), Springer, 2005. – 388 p. 16. Hakima Chaouchi, *The Internet of Things: Connecting Objects*, John Wiley & Sons, 2010. – 265 p. 17. Бочкарьов О.Ю. Структурна адаптація автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп’ютерні системи та мережі”. – 2010. – № 688. – С. 16–22. 18. Stuart Russell, Peter Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 3rd Edition, Prentice Hall, 2009. – 1152 p. 19. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. – М.: Наука, 1969. – 316 с. 20. Варшавский В.И. Коллективное поведение автоматов. – М.: Наука, 1973. – 408 с. 21. Трухаев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределённости. – М.: Наука, 1981. – 257 с. 22. *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, by Gerhard Weiss (Editor), MIT Press, 2000. – 648 p. 23. 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”. – 2009. – № 658. – С. 15–20. 24. Jörn Behrens, *Adaptive atmospheric modeling: key techniques in grid generation, data structures, and numerical operations with applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 25. Botchkaryov A., Kovala S. Concept of Multi-agent Conditional Interplay // *In Proceedings of EUROSIM/UKSim 10th International Conference on Modelling and Simulation*, Cambridge, England, 1–3 April, 2008. – P.100–105. 26. Eric Bonabeau, Marco Dorigo, Guy Theraulaz, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. – Oxford University Press, 1999. – 288 p. 27. Camazine, Deneubourg, Franks, et al., *Self-Organization in Biological Systems*. – Princeton University Press, 2001. – 560 p. 28. Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Муляревич О.В. Нові підходи до розв’язку задач комбінаторної оптимізації колективом автономних агентів // Матеріали 5-ї Міжнародної науково-технічної конференції “Сучасні комп’ютерні системи та мережі: розробка та використання” (ACSN-2011), Львів, 29 вересня - 1 жовтня, 2011. – С. 227–230.