

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

Бочкарьов Олексій Юрійович



УДК 004.75:004.896

**ОРГАНІЗАЦІЯ АДАПТИВНИХ ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ
ПРОЦЕСІВ В АВТОНОМНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному університеті "Львівська політехніка" Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Голембо Вадим Адольфович,
доцент кафедри електронних обчислювальних машин
Національного університету «Львівська політехніка»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Русин Богдан Павлович,
завідувач відділу методів та систем дистанційного
зондування Фізико-механічного інституту
ім. Г.В.Карпенка НАН України, м. Львів,

доктор технічних наук, професор
Петух Анатолій Михайлович,
завідувач кафедри програмного забезпечення
Вінницького Національного Технічного
Університету, м. Вінниця.

Захист відбудеться 27 червня 2019 року об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. С. Бандери, 28^а, ауд. 711 5-го навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. Професорська, 1)

Автореферат розісланий 27 травня 2019 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., проф.



Луцик Я. Т.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтенсивний розвиток та впровадження інформаційних технологій в усіх сферах людської діяльності відзначається збільшенням автономності та масштабу відповідних комп'ютерних та програмних систем. Відтак дослідження та розробки в області автономних розподілених систем (АРС) набувають все більшої актуальності. Одним з ключових моментів в роботі таких систем є організація вимірювально-обчислювальних процесів (ВО-процесів), які 1) збирають інформацію про оточення АРС, про її об'єкт управління (цільове середовище) та про роботу самої АРС, а також 2) виконують попередню обробку зібраної інформації для її подальшого використання системами управління та іншими компонентами АРС. При цьому внаслідок автономності та розподіленості таких систем виникає потреба у використанні методів адаптації ВО-процесів до збурень у оточенні АРС, недетермінованих змін об'єкту управління та змін у роботі самої АРС (викликаних, наприклад, частковою відмовою її вузлів чи зменшенням запасу енергії). В найбільш цікавих випадках йде мова про делегування значної частини повноважень по прийняттю рішень щодо роботи АРС адаптивним ВО-процесам на основі концепції інтелектуального автономного агента (intelligent autonomous agent) та технологій багато-агентних систем (multi-agent systems). В рамках цього підходу окремий вимірювально-обчислювальний вузол АРС отримав назву «вимірювальний агент», поведінку якого реалізує відповідний адаптивний ВО-процес. В даній роботі розглядається актуальна проблема організації адаптивних ВО-процесів як відображення та результат колективної поведінки автономних вимірювальних агентів.

Проблема організації адаптивних ВО-процесів в АРС досліджується багатьма науковими групами та школами. На особливий інтерес серед цих досліджень заслуговують спроби забезпечити можливість самостійного пошуку колективом вимірювальних агентів найкращого (згідно заданих критеріїв) способу збору та попередньої обробки інформації та відповідної організації адаптивних ВО-процесів в АРС (за умов повністю децентралізованого управління при відсутності центру управління). Однак більшість запропонованих в цьому напрямку рішень відрізняються сильною прив'язкою до конкретних методів оптимізації процедури збору інформації, на яких вони засновані, що унеможливує їх застосування для вирішення інших, іноді дуже схожих за змістом задач. Тому, актуальною є наукова задача пошуку та реалізації універсальних гнучких рішень щодо організації адаптивних ВО-процесів на основі узагальненого опису проблематики автономних розподілених систем, які б забезпечували можливість більш ефективної адаптації ВО-процесів до змін у оточенні АРС, змін у об'єктах управління та дослідження і змін у самій АРС, а також дозволяли враховувати специфіку роботи вимірювально-обчислювальних систем та систем обміну інформацією з точки зору проблем, пов'язаних з розподілом вимірювальних, обчислювальних та комунікаційних ресурсів, їх нестачею та можливими відмовами відповідних апаратних засобів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри електронних обчислювальних машин Національного університету «Львівська політехніка» в межах наукового напрямку кафедри: «Питання теорії, проектування та реалізації

комп'ютерних систем та мереж, а також комп'ютерних засобів, вузлів, приладів і пристроїв вимірювальних, інформаційних, керуючих, телекомунікаційних та кіберфізичних систем». Представлені в дисертації дослідження проводились в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: «Розробка нових принципів побудови вимірювально-обчислювальних мереж з елементами самоорганізації для екологічного моніторингу», 2000-2001 рр. (номер державної реєстрації 0100U000530), «Інтелектуальні реконфігуровані нарощувані вимірювально-обчислювальні мережі екологічного моніторингу: принципи структурної самоорганізації та функціонування», 2002-2003 рр. (номер державної реєстрації 0102U001163), «Конфігуровані вимірювально-обчислювальні мережі інтелектуальних автономних агентів для вирішення задач моніторингу навколишнього середовища», 2004-2006 рр. (номер державної реєстрації 0104U002284), «Інтеграція методів і засобів вимірювання, автоматизації, опрацювання та захисту інформації в базисі кібер-фізичних систем», 2015-2017 рр. (номер державної реєстрації 0115U000446).

Мета і завдання дослідження. Метою досліджень є розроблення нових методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах на основі принципів децентралізованого управління та самоорганізації. Для досягнення мети в роботі необхідно вирішити наступні основні завдання:

- провести аналіз існуючих підходів до розв'язання проблеми організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах та відомих методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів;

- розробити метод структурної адаптації вимірювально-обчислювальних процесів з використанням методів навчання з підкріпленням у стаціонарному випадковому середовищі;

- оцінити ефективність, надійність та живучість розробленого методу структурної адаптації вимірювально-обчислювальних процесів у порівнянні з методами параметричної адаптації;

- розробити метод координації вимірювально-обчислювальних процесів на основі відкладеної у часі інформаційної взаємодії;

- розробити моделі та методи децентралізованого управління адаптивними вимірювально-обчислювальними процесами за умов динамічних змін їх кількості та параметрів інформаційної взаємодії процесів;

- розробити спосіб функціонального узгодження методів організації адаптивних ВО-процесів та методів просторової самоорганізації мобільних вимірювальних агентів (МВА).

Об'єкт дослідження – автономні децентралізовані розподілені системи з елементами самоорганізації.

Предмет дослідження – методи організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних децентралізованих розподілених системах.

Методи дослідження. Дослідження виконувалися з використанням методів системного аналізу, математичного програмування, теорії випадкових процесів, прикладної теорії цифрових автоматів, теорії алгоритмів та методів штучного інтелекту.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано метод структурної адаптації ВО-процесів в децентралізованих АРС на основі машинного навчання блоку прийняття рішень щодо вибору дій на структурному та підпорядкованому йому функціональному рівні, який на відміну від відомих методів параметричної адаптації забезпечує більш ефективний розподіл вимірювальних та обчислювальних ресурсів за умов невизначеності та більш високу надійність і живучість підсистем збору інформації АРС.

2. Вперше запропоновано метод координації адаптивних ВО-процесів на основі відкладеної у часі інформаційної взаємодії у розподіленому координаційному просторі шляхом передавання та асинхронної реплікації координуючих повідомлень із заданим часом зберігання, з використанням запропонованого набору локальних правил зміни стану координаційного простору, чим досягається, в порівнянні з відомими, взаємне виключення при виборі дослідницьких дій та стійкість координації до відмов ВО-процесів і втрат координуючих повідомлень.

3. Вперше запропоновано метод децентралізованого управління адаптивними ВО-процесами в АРС на основі принципу врівноваження та навчання з підкріпленням за методом нормованої експоненційної функції, який на відміну від відомих, дає змогу організувати автономні розподілені дослідження за умов динамічних змін кількості ВО-процесів та ненадійної обмеженої інформаційної взаємодії між ВО-процесами.

4. Удосконалено спосіб функціонального узгодження методів організації адаптивних ВО-процесів та методів просторової самоорганізації мобільних вимірювальних агентів шляхом паралельного виконання відповідного ВО-процесу та процесу управління переміщенням МВА з використанням запропонованого протоколу їх взаємодії та алгоритму планування паралельного виконання, що дає змогу прискорити обчислення в блоці прийняття рішень МВА.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені методи організації адаптивних ВО-процесів реалізовані у вигляді програмно-алгоритмічного забезпечення, яке може бути застосовано при створенні автономних інтелектуальних засобів збору інформації у складі мобільних кіберфізичних систем, автономних систем розподіленої робототехніки та розподілених програмних систем на основі технологій контекстно-залежних і мобільних обчислень. Зокрема програмна реалізація методу структурної адаптації ВО-процесів використана у Науково-виробничому приватному підприємстві «Спаринг-Віст Центр» в структурі та прототипі сенсорного та виконавчого вузлів автономної розподіленої системи виявлення та відстеження порушників. Програмна реалізація методів децентралізованого управління ВО-процесами впроваджена у ТОВ «Інтелектуальні вендінгові системи» для підвищення надійності роботи та живучості розподіленого процесингового програмно-апаратного комплексу та у ТОВ «ДЖЕТСОФТПРО УКРАЇНА» для вирішення проблеми масштабування в роботі програмних технологій збору інформації в системах моніторингу мобільних комп'ютерних мереж. Теоретичні і практичні результати дисертації використано у навчальному процесі на кафедрі електронних обчислювальних машин Національного університету «Львівська політехніка» в робочих програмах навчальних дисциплін «Комп'ютерні

системи», «Теорія інтелектуальних систем», «Організація обчислювальних процесів в паралельних системах».

Особистий внесок здобувача. Основний зміст роботи, всі теоретичні та практичні результати, висновки і дослідження, які представлено до захисту, одержані автором особисто. У публікаціях, написаних у співавторстві, автору належать: моделі колективної поведінки вимірювальних агентів, метод структурної адаптації ВО-процесів, моделі та методи децентралізованого управління адаптивними ВО-процесами, розв'язки задач колективної поведінки МВА.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, викладені в дисертаційній роботі, доповідались та обговорювалися на наукових семінарах кафедри електронних обчислювальних машин, а також на міжнародних конференціях та наукових семінарах: International Conference “Advanced Computer Systems and Network: Design and Application” (м. Львів, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013), 20th European Conference on Modelling and Simulation (Bonn, Germany, 2006), NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (Edinburgh, UK, 2007), EUROSIM/UKSim 10th International Conference on Modelling and Simulation (Cambridge, UK, 2008), 4-а Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси» (м. Київ, 2011), Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю «Підводна техніка і технологія» (м. Миколаїв, 2012), Науковий семінар «Кіберфізичні системи: досягнення та виклики», НУ «Львівська політехніка» (м. Львів, 2015, 2016, 2017).

Публікації. За результатами проведених досліджень опубліковано 40 наукових праць, в тому числі 21 стаття у фахових наукових виданнях, затверджених Міністерством освіти і науки України, 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, що входять до міжнародних наукометричних баз, 17 доповідей у матеріалах конференцій та семінарів.

Структура та обсяг роботи. Повний обсяг дисертації становить 219 сторінок, з яких 130 сторінок основного тексту. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яťох розділів, висновків, списку використаних джерел (121 найменування) та додатків. Робота містить 54 рисунки, 10 таблиць та 3 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано її актуальність, показано зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету та завдання досліджень, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про впровадження та апробацію результатів роботи.

У **першому розділі** виконано аналіз проблеми організації адаптивних ВО-процесів в автономних розподілених системах. Розглянуто особливості побудови та функціонування АРС та запропоновано узагальнений опис автономної розподіленої системи на основі принципів децентралізованого управління та самоорганізації. Запропоновано узагальнену постановку задачі організації адаптивних ВО-процесів в АРС. Проаналізовано дві основні проблеми автономних розподілених досліджень: проблема розміщення та проблема управління. Наведено аналіз моделей та методів організації адаптивних ВО-процесів в автономних розподілених системах. Виконано аналіз основних принципів самоорганізації ВО-процесів в автономних розподілених

системах. Сформульовано задачу організації ВО-процесів в автономних розподілених системах.

У **другому розділі** розроблено модель організації адаптивних ВО-процесів в задачах автономних розподілених досліджень

$$M_p = \langle D, C(D), A, G, f_q(d_i, d_j), R(d), W \rangle, \quad (1)$$

де $D = \{d\}_M$ – множина джерел інформації, яка характеризується деякою попередньо невідомою структурою внутрішніх зв'язків (залежностей між джерелами інформації) $C(D) = \{c(d_i, d_j)\}$, $A = \{p(a)\}_N$, $N < M$ – колектив адаптивних ВО-процесів, кожний з яких реалізує поведінку відповідного автономного вимірювального агента у вигляді послідовності перемикань між джерелами за допомогою функції перемикань $d_{t+1} = f_a(d_t, t)$, $N < M$, G – схема припустимих перемикань між джерелами інформації, $f_q(d_i, d_j)$ – функція витрат на перемикання, $R(d)$ – спосіб оцінки інформативності джерел інформації, W – критерій ефективності організації адаптивних ВО-процесів.

В кожний момент часу t ВО-процес $p(a)$ отримує інформацію з обраного джерела d_t і приймає рішення про перемикання на інше джерело d_{t+1} у наступному кроці. Розподіл ВО-процесів по джерелах задає відповідний розподіл вимірювальних та обчислювальних ресурсів. На основі обраного способу оцінки інформативності джерел інформації $R(d)$ визначається кількість інформації $I(t)$, зібраної ВО-процесами на момент часу t . Середня кількість зібраної інформації за один крок: $Q(t) = I(t)/Nt$. Рішення про перемикання між джерелами кожний ВО-процес приймає самостійно (центр управління діями ВО-процесів відсутній) за умов невизначеності щодо інформативності джерел D , залежностей між ними $C(D)$ та дій інших ВО-процесів. Мета організації адаптивних ВО-процесів полягає у зборі якомога більшої кількості інформації на протязі виділеного на дослідження проміжку часу T за умови не перевищення сукупних витрат на перемикання між джерелами деякої заданої величини Z :

$$W: I_T \rightarrow \max, Q(T) \rightarrow \max, \Sigma f_q < Z. \quad (2)$$

Відтак колектив адаптивних ВО-процесів здійснює пошук такого розподілу вимірювальних та обчислювальних ресурсів, який забезпечує (2).

Розроблено метод структурної адаптації (МСА) ВО-процесів на основі машинного навчання блоку прийняття рішень щодо вибору дій на структурному та підпорядкованому йому функціональному рівні (рис.1), який забезпечує більш ефективний розподіл вимірювальних та обчислювальних ресурсів, більш високу надійність та живучість підсистем збору інформації АРС. Згідно методу структурної адаптації $MSA = \langle (A_w, A_r), A_s, S \rangle$ ВО-процес на функціональному рівні працює в одному з двох режимів: 1) в основному режимі $A_w = (R_x(a), U_x(a))$ ВО-процес збирає інформацію про об'єкт дослідження, 2) в службовому режимі $A_r = (R_y(a), U_y(a))$ ВО-процес збирає інформацію про структуру внутрішніх зв'язків джерел інформації $C(D)$, яка дає змогу покращити роботу в основному режимі. Одночасно з цим на структурному рівні $A_s = (R_s(a), U_s(a))$ ВО-процес приймає рішення про перемикання між режимами (A_w, A_r) , вносячи зміни в структуру $S = \langle P(a, t), \{\sigma(a, a')\} \rangle$, де $P(a, t)$ – біжучий розподіл ВО-процесів по режимах роботи на функціональному рівні, $\{\sigma(a, a')\}$ – множина координаційних зв'язків, обумовлених розподілом $P(a, t)$.

Для кожного з двох режимів (A_w, A_r) функціонального рівня та на структурному рівні визначені функції оцінки $(R_x(a), R_y(a), R_s(a))$ та процедури

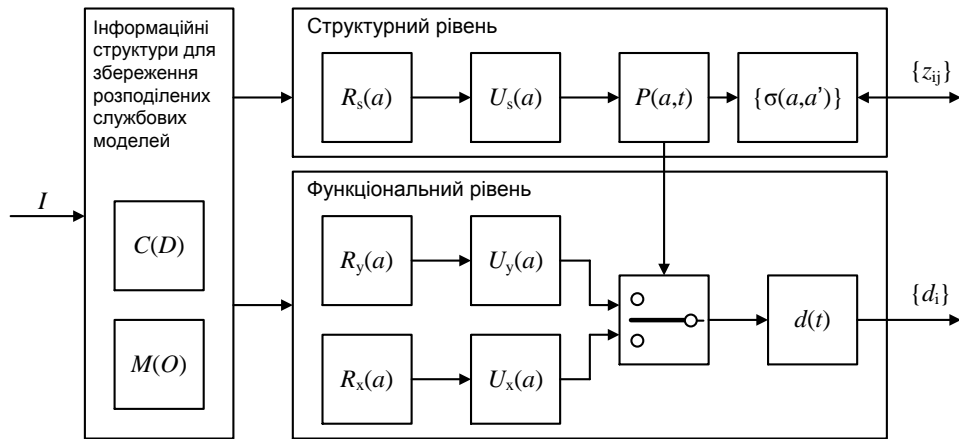


Рис.1. Схема роботи методу структурної адаптації

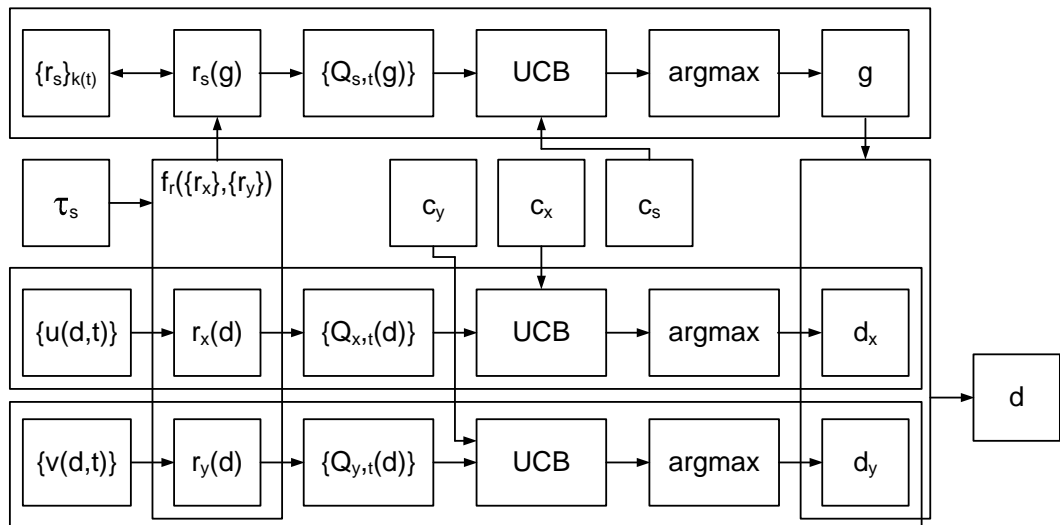


Рис.2. Схема роботи МСА на основі верхньої довірчої межі (МСА-UCB)

прийняття рішень ($U_x(a)$, $U_y(a)$, $U_s(a)$). Зокрема $R_x(a)$: $r_x(d)=f_u(\{u(d,t)\})$ – функція оцінки вибору джерела інформації d в режимі A_w , де $u(d,t)$ – приріст інформації про об’єкт дослідження; $R_y(a)$: $r_y(d)=f_v(\{v(d,t)\})$ – функція оцінки вибору джерела інформації d в режимі A_r , де (d,t) – приріст інформації про структуру внутрішніх зв’язків між джерелами інформації $C(D)$; $R_s(a)$: $r_s(g)=f_r(\{r_x(d)\},\{r_y(d)\})+F(\{r_s\}_{k(t)})$ – функція оцінки вибору режиму роботи на функціональному рівні, де $g \in \{A_w, A_r\}$, $f_r(\{r_x(d)\},\{r_y(d)\})$ – функція оцінки роботи у режимах (A_w, A_r), $F(\{r_s\}_{k(t)})$ – функція оцінки роботи інших ВО-процесів, $k(t)=0, \dots, N-1$.

Процедури прийняття рішень визначені як $U_x(a)=\{F_x(t), f_x(d_t,t), J_x(a)\}$, $U_y(a)=\{F_y(t), f_y(d_t,t), J_y(a)\}$, $U_s(a)=\{F_s(t), f_s(g_t,t), J_s(a), \tau_s\}$, де τ_s – часовий крок спрацювання $U_s(a)$, $(F_x(t), F_y(t), F_s(t))$ – цільові функції, такі що

$$F_x(t) = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t r_{x,i}(d), \quad F_y(t) = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t r_{y,i}(d), \quad F_s(t) = \frac{\tau_s}{t} \sum_{i=1}^{t/\tau_s} r_{s,i}(g), \quad (3)$$

$(J_x(a), J_y(a), J_s(a))$ – способи інформаційної взаємодії та координації роботи з іншими ВО-процесами: $J_x(a) = \{\sigma(A_w, A_w), \sigma(A_w, A_r)\}$, $J_y(a) = \{\sigma(A_r, A_r), \sigma(A_r, A_w)\}$, $J_s(a) = \{\sigma(A_s, A_s)\}$, $(f_x(d_t,t), f_y(d_t,t))$ – функції перемикання джерел інформації, $f_s(g_t,t)$ – функція перемикання режимів роботи. В кожному з двох режимів функціонального рівня (A_w і A_r) виконується процедура оптимізації вибору дослідницьких дій. Одночасно з цим на структурному рівні виконується оптимізація кількісного розподілу ВО-процесів

по режимах A_w і A_r . В якості процедури оптимізації в роботі використано методи навчання з підкріпленням в стаціонарному випадковому середовищі, зокрема 1) метод нормованої експоненційної функції (softmax action selection) та 2) метод верхньої довірчої межі (Upper-Confidence-Bound). Для кожного з цих методів розраховується оціночна вага дії:

$$Q_{x,t}(d) = Q_{x,t-1}(d) + \alpha_x(r_{x,t}(d) - Q_{x,t-1}(d)), \quad (4)$$

$$Q_{y,t}(d) = Q_{y,t-1}(d) + \alpha_y(r_{y,t}(d) - Q_{y,t-1}(d)), \quad (5)$$

$$Q_{s,t}(g) = Q_{s,t-1}(g) + \alpha_s(r_{s,t}(g) - Q_{s,t-1}(g)), \quad (6)$$

де $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_s \in (0,1]$ – крок навчання.

У МСА на основі нормованої експоненційної функції (МСА-softmax) наступна дія обирається з ймовірністю:

$$p_{x,t}(d) = \frac{e^{Q_{x,t}(d)/\mu_x}}{\sum_{D_a} e^{Q_{x,t}(b)/\mu_x}}, \quad p_{y,t}(d) = \frac{e^{Q_{y,t}(d)/\mu_y}}{\sum_{D_a} e^{Q_{y,t}(b)/\mu_y}}, \quad p_{s,t}(g) = \frac{e^{Q_{s,t}(g)/\mu_s}}{\sum_{A_w, A_r} e^{Q_{s,t}(h)/\mu_s}}. \quad (7)$$

де $Q_t(d)$ — оціночна вага дії d , D_a – підмножина дій, доступних даному ВО-процесу для вибору ($b \in D_a$), μ – масштабуючий коефіцієнт ($\mu > 0, \mu = \text{const}$).

У МСА на основі верхньої довірчої межі (МСА-UCB) (рис.2) наступна дія обирається як:

$$d_{t+1} = \operatorname{argmax}_{D_a} \left(Q_{x,t}(d) + c_x \sqrt{\frac{\ln(t)}{k_{x,t}(d)}} \right), \quad (8)$$

$$d_{t+1} = \operatorname{argmax}_{D_a} \left(Q_{y,t}(d) + c_y \sqrt{\frac{\ln(t)}{k_{y,t}(d)}} \right), \quad (9)$$

$$g_{t/\tau_s+1} = \operatorname{argmax}_{\{A_w, A_r\}} \left(Q_{s,t}(d) + c_s \sqrt{\frac{\ln(t/\tau_s)}{k_{s,t/\tau_s}(d)}} \right), \quad (10)$$

де c – масштабуючий коефіцієнт ($c > 0$), ($k_{x,t}, k_{y,t}, k_{s,t/\tau_s}$) – значення лічильників дії d .

Дослідження та моделювання роботи методів адаптації (рис.3, рис.4) показало перевагу методу структурної адаптації над методами параметричної адаптації ВО-процесів. Зокрема в середньому для типових значень ($N, M, 0.5 < \lambda < 1$) та інших параметрів задачі середня кількість зібраної інформації за один крок для МСА на 23.2% більше ніж для МПА. Порівняльна оцінка обчислювальних витрат на роботу МСА та МПА наведена в табл.1 і табл.2, де $k=M/N$ – об'єм вхідних даних одного циклу управління, w_1, w_2, w_3 – коефіцієнти масштабування обчислювальних витрат на виконання операцій різної складності. В середньому кількість обчислювальних витрат на роботу МСА більше на 42.3% в порівнянні з МПА.

Досліджено надійність роботи МСА за допомогою коефіцієнта збереження ефективності K_Q для різних значень інтенсивності потоку відмов ВО-процесів λ_p (табл.3). За допомогою коефіцієнту швидкості відновлення K_R для різних значень відносних одночасних раптових відмов $p_v = N_x/N$ досліджено живучість колективу ВО-процесів, організованих за методом структурної адаптації (табл.4). За надійністю роботи МСА переважає МПА в середньому на 21.1%, усереднений показник живучості для МСА більший ніж для МПА на 18.4%.

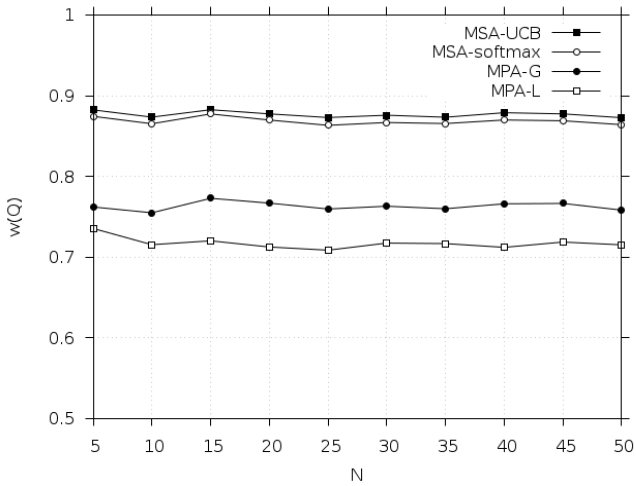


Рис.3. Результати моделювання роботи МСА, $\lambda=0.8$, $M=4N$, $T=1000$, $n=10000$

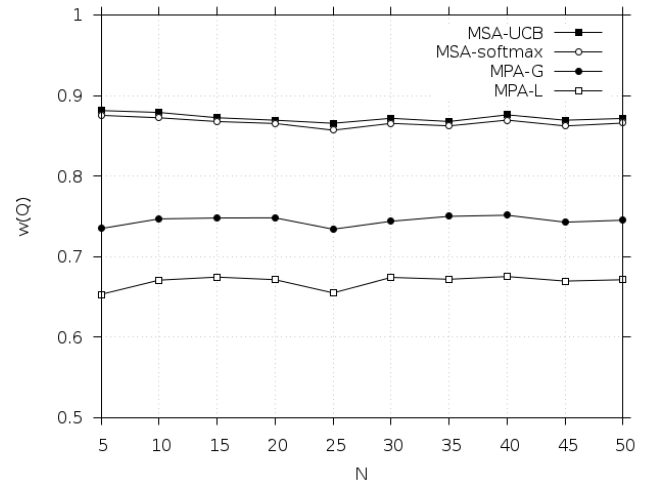


Рис.4. Результати моделювання роботи МСА, $\lambda=0.9$, $M=4N$, $T=1000$, $n=10000$

Таблиця 1.

Кількість операцій $V_s(k)$ в одному циклі управління, $w_1 = 1$, $w_2 = 10$, $w_3 = 50$
(V_s – розрахунок, V_s^* – оцінка отримана експериментально)

	k=10		k=20		k=30		k=40		k=50	
	V_s	V_s^*	V_s	V_s^*	V_s	V_s^*	V_s	V_s^*	V_s	V_s^*
MPA-L	32	26.4	52	41.6	72	56.6	92	72.1	112	87.1
MPA-G	42	37.1	60	50.3	78	64.0	96	77.3	114	91.5
MSA-softmax	1000	994.5	1770	1759.6	2540	2524.8	3310	3289.1	4080	4054.1
MSA-UCB	1524	1518.5	2764	2753.4	4004	3988.7	5244	5223.7	6484	6457.8

Таблиця 2.

Кількість кроків обчислень $V_t(k,p)$ в одному циклі управління, $k=30$, $w_1 = 1$, $w_2 = 10$, $w_3 = 50$
(p – показник розпаралелення, V_t – розрахунок, V_t^* – оцінка отримана експериментально)

	p=2		p=4		p=6		p=8		p=10	
	V_t	V_t^*	V_t	V_t^*	V_t	V_t^*	V_t	V_t^*	V_t	V_t^*
MPA-L	53.5	55.1	48.7	50.6	46.1	50.0	44.8	49.8	44.1	49.4
MPA-G	61.4	63.3	54.7	58.0	52.1	57.6	50.8	57.2	50.0	57.0
MSA-softmax	1424.5	1892.4	866.7	1559.6	680.8	1456.9	587.8	1396.1	532.1	1362.4
MSA-UCB	2103.5	2559.4	1153.2	1859.8	836.4	1602.3	678.1	1488.3	583.1	1429.4

Розроблено метод координації адаптивних ВО-процесів на основі відкладеної у часі інформаційної взаємодії у розподіленому координаційному просторі (рис.5) шляхом передавання та асинхронної реплікації координуючих повідомлень із заданим часом зберігання, з використанням запропонованого набору локальних правил зміни стану координаційного простору, чим досягається, взаємне виключення при виборі дослідницьких дій та стійкість координації до відмов ВО-процесів і втрат координуючих повідомлень. Розроблено спосіб локального управління адаптивним ВО-процесом на основі методу координації та відповідний алгоритм. Запропоновано концепцію багатоагентної обумовленої взаємодії, згідно якої ВО-процеси координуються за допомогою координаційного простору та відповідних правил поведінки в ньому. Розроблено спосіб локального управління адаптивним ВО-процесом на основі методу координації та відповідний алгоритм (рис.6).

Коефіцієнт збереження ефективності $K_0(\lambda_p)$, $M=500$, $N=20$, $\lambda=0.8$, $T=1000$, $n=10000$

	λ_p								
	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.018
MPA-L	0.612	0.399	0.289	0.223	0.184	0.154	0.135	0.123	0.114
MPA-G	0.677	0.446	0.324	0.253	0.204	0.173	0.154	0.136	0.124
MSA-softmax	0.804	0.525	0.389	0.305	0.251	0.214	0.190	0.173	0.161
MSA-UCB	0.839	0.553	0.409	0.322	0.267	0.226	0.203	0.185	0.170

Таблиця 4.

Коефіцієнт швидкості відновлення $K_R(p_v)$, $M=500$, $N=20$, $\lambda=0.8$, $T_1=1000$, $T_2=1000$, $n=10000$

	$p_v=N_x/N$								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
MPA-L	0.588	0.380	0.266	0.201	0.158	0.135	0.111	0.096	0.090
MPA-G	0.659	0.426	0.306	0.239	0.189	0.159	0.142	0.122	0.113
MSA-softmax	0.804	0.531	0.385	0.299	0.243	0.209	0.182	0.163	0.151
MSA-UCB	0.836	0.554	0.407	0.320	0.263	0.231	0.197	0.179	0.172

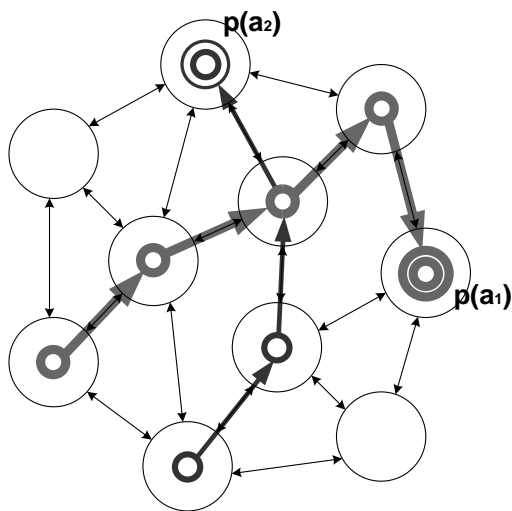
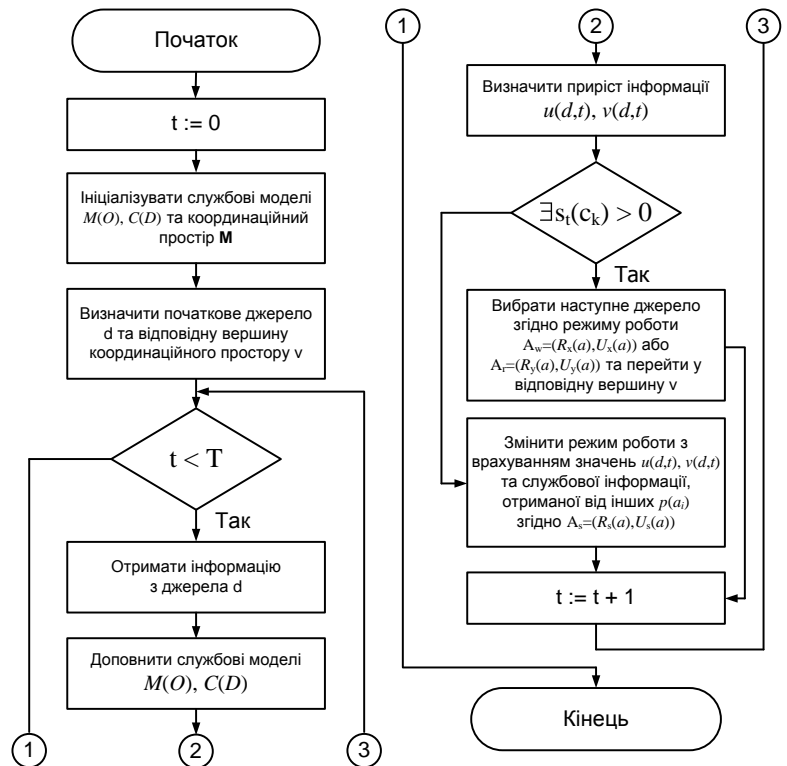
Рис. 5. Приклад ділянки координаційного простору M з двома ВО-процесами $(p(a_1), p(a_2))$ 

Рис. 6. Граф-схема алгоритму управління адаптивним ВО-процесом

У третьому розділі розроблено модель децентралізованого управління ВО-процесами на основі принципу врівноваження, за допомогою якої досліджено проблему узгодження спільних колективних дій з точки зору пошуку ефективної схеми взаємодоповнення дій окремих ВО-процесів за умов відсутності центру управління (тобто подолання невизначеності щодо дій інших агентів). Модель має вигляд:

$$M_D = \langle A, G(a,t), X, C(a), q(t)=f(F_q, \{x_t(a)\}_{N(t)}) \rangle, \quad (11)$$

де $A=\{a\}_{N(t)}$, – колектив ВО-процесів (агентів) у кількості $N(t)$, які розміщені в деякому просторі X за координатами $\{x_t(a)\}_{N(t)}$, $G(a,t)$ – схема інформаційної

взаємодії ВО-процесів, $C(a)$ множина обмежень, які накладаються на координати агентів у просторі X , $q(t)$ – індикатор стану рівноваги та відстані до нього, такий, що

$$q(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} (F_q - x_t(a_i)), \quad (12)$$

де F_q – параметр умови рівноваги, значення якого не відоме ВО-процесам. Перед колективом ВО-процесів ставиться завдання знайти таке розміщення $\sigma(A) = \{x_t(a)\}_{N(t)}$, для якого б виконувалось $q(t) = 0$ (значення $q(t)$ або його знак повідомляється агентам на кожному кроці, окремий агент може змінювати лише власну координату $x_t(a)$). Відтак за допомогою моделі M_D пошук ефективної схеми взаємодоповнення дій окремих ВО-процесів у ході вирішення деякої задачі моделюється як пошук стану рівноваги.

Ефективність пошуку визначається як $w(T) = T_{\min}/T$, де T – час, за який колектив знайшов стан рівноваги, T_{\min} – мінімально можливий час знаходження стану рівноваги для заданих (N, M, F_q, σ_0) . Модель M_D дозволяє дослідити вплив динаміки змін кількості ВО-процесів $N(t)$ та параметрів схеми інформаційної взаємодії $G(a, t)$ на швидкість пошуку колективом стану рівноваги.

В рамках моделі M_D розроблено метод децентралізованого управління (МДУ) ВО-процесами. Цілеспрямованість дій ВО-процесів забезпечена використанням методу навчання з підкріпленням у стаціонарному випадковому середовищі (методу нормованої експоненційної функції). В роботі методу реалізовано такі принципи (рис.7): 1) максимальна величина кроку $\Delta x_{\max}(a)$ пропорційна швидкості та величині зміни $q(t)$: $\Delta x_{\max}(a) = f_v(\{q(t)\}_{\Delta t})$, 2) оціночна вага дії $V_t(a, d)$ уточнюється відповідними значеннями оціночних ваг $\{V_t(a_i, d)\}_{K(t)}$, які на кроці t вдалось отримати від інших агентів за умов біжучого стану схеми інформаційної взаємодії $G(a, t)$. Згідно методу нормованої експоненційної функції наступна дія $d \in \{-\Delta x_{\max}(a), \dots, 0, \dots, \Delta x_{\max}(a)\}$ обирається з ймовірністю

$$p_t(d) = \frac{e^{v_t(A, d)/\mu}}{\sum_{D_a} e^{v_t(A, b)/\mu}}, \quad (13)$$

де μ – масштабуючий коефіцієнт ($\mu > 0, \mu = \text{const}$), $V_t(A, d)$ – оціночна вага дії d , уточнена даними, що отримані від $k(t)$ сусідніх агентів (визначених згідно $G(a, t)$):

$$V_t(A, d) = \sum_{i=1}^{k(t)} w_i V_t(a_i, d), \quad \sum_{i=1}^{k(t)} w_i = 1 \quad (14)$$

де $\{w_i\}_{k(t)}$ – вагові коефіцієнти. Локальні значення оціночних ваг $V_t(a, d)$ змінюються згідно отриманого виграшу $r(t) = q(t) - q(t-1)$:

$$V_{t+1}(a, d) = V_t(a, d) + \alpha(r_t - V_t(a, d)), \quad (15)$$

де $\alpha \in (0, 1]$ – крок навчання.

В результаті дослідження та моделювання роботи розробленого методу децентралізованого управління встановлено, що використання методу нормованої експоненційної функції (МДУ-softmax) забезпечує більш ефективний пошук рішення у порівнянні з методом адаптивного випадкового пошуку (АВП-0 – адаптивний випадковий пошук без обміну інформацією, АВП-k – адаптивний випадковий пошук з обміном інформацією, в якому k – кількість сусідів, з якими відбувається обмін інформацією на одному кроці) (рис.8, рис.9).

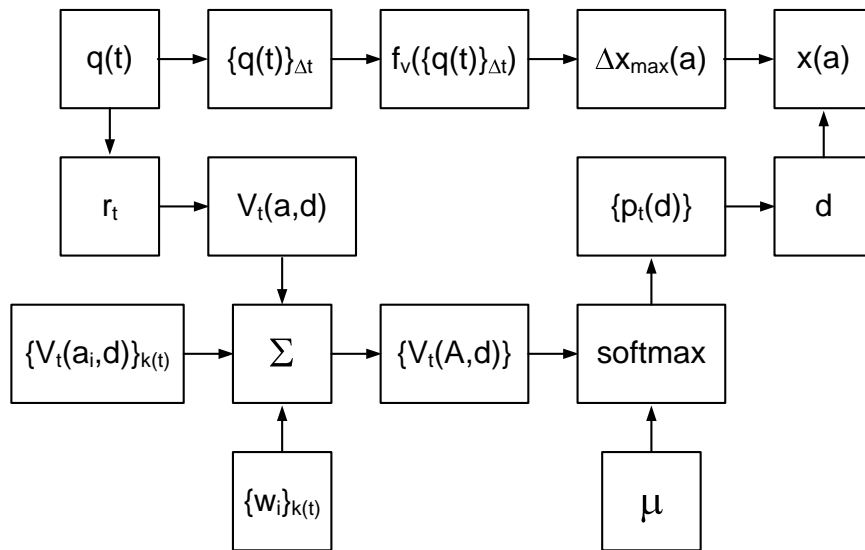
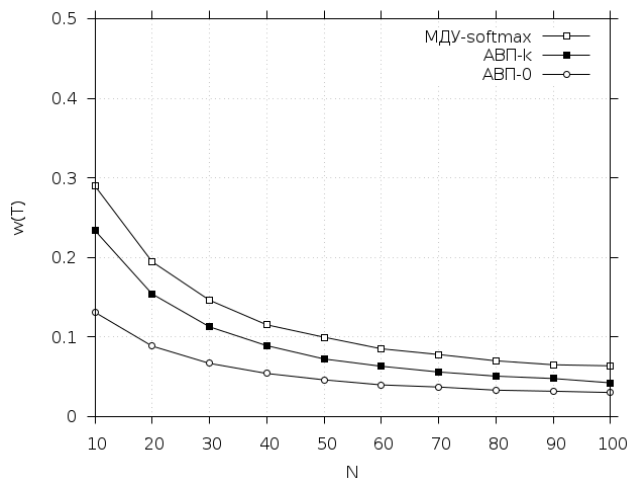
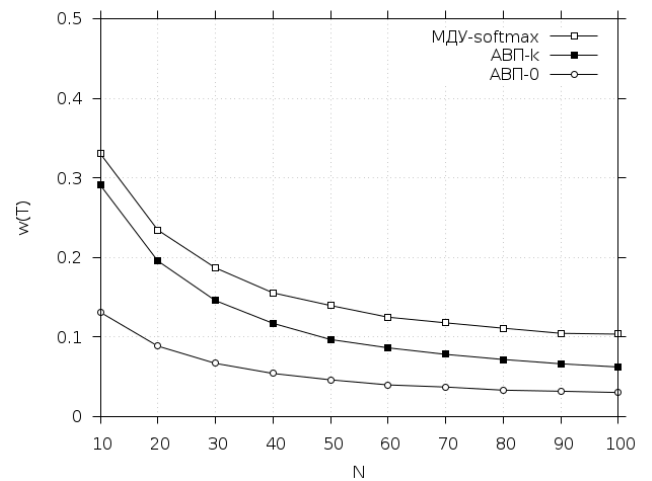


Рис. 7. Схема роботи методу децентралізованого управління (МДУ-softmax)

Рис.8. Результати моделювання роботи МДУ, $X=1000$, $F_q=500$, $k=2$, $n=10000$ Рис.9. Результати моделювання роботи МДУ, $X=1000$, $F_q=500$, $k=10$, $n=10000$

За допомогою коефіцієнту збереження ефективності K_T , було отримано оцінку залежності роботи МДУ-softmax від зміни кількості ВО-процесів (у вигляді стаціонарного пуасонівського потоку відмов ВО-процесів з інтенсивністю потоку λ_a на початку роботи) (табл. 5) та зміни схеми інформаційної взаємодії $G(t)$ (у вигляді стаціонарного пуасонівського потоку відмов каналів зв'язку між ВО-процесами з інтенсивністю потоку λ_g на початку роботи) (табл. 6). Коефіцієнти збереження ефективності $K_T(\lambda_a)$ та $K_T(\lambda_g)$ визначено шляхом моделювання роботи МДУ-softmax. При цьому $K_T(\lambda_a) = w(T)/w(T_n)$, де $w(T)$ – ефективність пошуку рівноваги при відмовах на перших T_1 кроках, а $w(T_n)$ – номінальна ефективність пошуку рівноваги без відмов на перших T_1 кроках. Згідно з отриманими результатами (табл.5, табл.6) МДУ-softmax дозволяє організувати автономні розподілені дослідження за умов динамічних змін кількості ВО-процесів та ненадійної обмеженої інформаційної взаємодії між ними.

Розроблено модель децентралізованого управління ВО-процесами на основі принципу інтерполяції (інтерполяційну модель колективної поведінки вимірювальних агентів), за допомогою якої досліджено проблему пошуку найкращого розміщення вимірювальних агентів в просторі об'єкта дослідження.

Розроблено модель децентралізованого управління ВО-процесами на основі принципу зменшення ентропії (ентропійну модель колективної поведінки вимірювальних агентів) для дослідження проблеми пошуку найкращого розміщення вимірювальних агентів на множині випадкових середовищ.

Таблиця 5.

Коефіцієнт збереження ефективності $K_T(\lambda_a)$, $X=1000$, $F_q=500$, $N=50$, $k=2$, $T_1=100$, $T_2=1000$, $n=10000$

	λ_a								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045
АВП-0	0.765	0.485	0.334	0.245	0.197	0.156	0.181	0.135	0.115
АВП-k	0.798	0.509	0.367	0.276	0.221	0.185	0.165	0.140	0.128
МДУ-softmax	0.841	0.590	0.459	0.385	0.331	0.301	0.281	0.261	0.247

Таблиця 6.

Коефіцієнт збереження ефективності $K_T(\lambda_g)$, $X=1000$, $F_q=500$, $N=50$, $k=(N-1)$, $T_1=100$, $T_2=1000$, $n=10000$

	λ_g								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045
АВП-k	0.796	0.510	0.362	0.279	0.228	0.186	0.164	0.140	0.126
МДУ-softmax	0.867	0.612	0.480	0.404	0.355	0.319	0.303	0.283	0.272

В четвертому розділі удосконалено спосіб функціонального узгодження методів організації ВО-процесів та методів просторової самоорганізації мобільних вимірювальних агентів (МВА) шляхом паралельного виконання відповідного ВО-процесу $p(a)$ та процесу управління переміщенням МВА $p(s)$, який реалізує методи просторової самоорганізації (рис.10). Паралельне виконання $p(a)$ та $p(s)$ організовано з використанням протоколу їх взаємодії $\Pi(a,s)$ та алгоритму планування паралельного виконання $\Lambda(a,s)$. Запропонований спосіб узгодження передбачає виконання декомпозиції (рис.10): $\{p(a,s) \rightarrow [p(a),p(s)]; C(a,s) \rightarrow C(a), C(s); W(a,s) \rightarrow W(a), W(s)\}$, де $C(a)$ – процедура координації на рівні спільних дослідницьких дій, $C(s)$ – процедура координації на рівні задач просторової самоорганізації, $W(a)$ – процедура оптимізації параметрів адаптивного ВО-процесу, $W(s)$ – процедура оптимізації параметрів процесу управління переміщенням МВА. Взаємодія адаптивного ВО-процесу $p(a)$ та підпорядкованого йому процесу управління переміщенням $p(s)$ в межах одного МВА здійснюється за протоколом $\Pi(a,s)=\{D; Y(d), Y(s)\}$ (рис.10), де $D=\{d(x)\}$ – команди від $p(a)$ до $p(s)$ з параметрами x , за допомогою яких адаптивний ВО-процес реалізує логіку спільних дослідницьких дій МВА, $Y(d)$ – повідомлення про статус виконання команд з боку $p(s)$, $Y(s)$ – повідомлення про стан процесу управління переміщенням $p(s)$. У елементи протоколу $\Pi(a,s)$ (команди D та повідомлення $Y(d), Y(s)$) відображається множина функціональних зв'язків між $p(a)$ і $p(s)$. Розподіл комунікаційних ресурсів $r(C)$ задається функцією $f_c(a,s)$. Розподіл обчислювальних ресурсів $r(p)$ між $p(a)$ та $p(s)$ задається функцією $f_p(a,s)$ та реалізується алгоритмом планування паралельного виконання $\Lambda(a,s)$:

$$\Lambda(a,s)=\{(P_s(a),P_s(s),P_d,c), (T,m,L), (U_p,U_c,U_T)\}, \quad (16)$$

де $P_s(a) < P_s(s)$ – статичні пріоритети потоків відповідно процесів $p(a)$ і $p(s)$; P_d – динамічний пріоритет потоку; c – оцінка часу, на протязі якого потік виконувався в

процесорі до моменту витіснення; T – квант часу, який виділений на виконання потоку; m – дільник кванту часу; L – показник біжучої завантаженості процесора у вигляді середньої кількості потоків в черзі очікування за час T ; U_p : $P_d(a)=P_s(a)+c(a)$, $P_d(s)=P_s(s)+c(s)$ – правило перерахунку динамічного пріоритету (застосовується для кожного потоку в черзі очікування через кожні T секунд), U_c : $c(a)=c(a)+2$, $c(s)=c(s)+1$ – правило перерахунку c (застосовується кожні T/m секунд для потоку, який знаходиться в процесорі), U_T : $c=(c \times L)/(L+1)$ – правило перерахунку c для потоків, що знаходяться в черзі очікування (застосовується кожні T секунд). В запропонованому алгоритмі планування $\Lambda(a,s)$ через кожні T секунд з черги очікування обирається на виконання потік з найбільшим значенням динамічного пріоритету. При цьому потоки процесу $p(s)$ мають більший статичний пріоритет та диспетчеризуються в меншому масштабі часу.

Запропонований спосіб функціонального узгодження $p(a)$ та $p(s)$ дозволив збільшити масштаб розпаралелення обчислень в блоці прийняття рішення МВА за рахунок зростання максимально можливої кількості одиниць розпаралелення (потоків) N_p внаслідок декомпозиції $p(a,s) \rightarrow [p(a),p(s)]$. Якщо у випадку $p(a,s)$ $N_p = \max(k,n)$, де k – оцінка можливостей розпаралелення обчислень для адаптивного ВО-процесу $p(a)$ (у вигляді кількості джерел інформації $k=M/N$, що припадають на один ВО-процес), n – оцінка можливостей розпаралелення обчислень для процесу управління переміщенням $p(s)$ (у вигляді середньої кількості сусідніх МВА, з якими даний МВА узгоджує свої переміщення), то у випадку $[p(a),p(s)]$ $N_p = k \times n$. Виходячи з цього, можна оцінити частку послідовних обчислень в одному циклі управління для обох випадків: 1) для $p(a,s)$: $\alpha_1 = \alpha_k = (x_a + nx_s)/(kx_a + nx_s)$, якщо $k > n$, і $\alpha_1 = \alpha_n = (x_s + kx_a)/(kx_a + nx_s)$, якщо $k < n$, де x_a , x_s – кількість послідовних операцій циклу управління в одному потоці відповідно процесів $p(a)$ і $p(s)$; 2) для $[p(a),p(s)]$: $\alpha_2 = (x_a + x_s)/(kx_a + nx_s)$. Згідно закону Амдала, оскільки $\alpha_2 < \alpha_k$ і $\alpha_2 < \alpha_n$, запропонований спосіб функціонального узгодження дає вигоду у прискоренні обчислень в блоці прийняття рішень МВА. Цей вигоду можна оцінити за допомогою відносного прискорення обчислень $g = S_p(\alpha_1, p) / S_p(\alpha_2, p)$, де $S_p(\alpha_1, p)$ – прискорення обчислень для випадку $p(a,s)$, а $S_p(\alpha_2, p)$ – прискорення обчислень для випадку $[p(a),p(s)]$. В результаті дослідження та моделювання запропонованого способу функціонального узгодження встановлено, що відносне прискорення обчислень для заданого показника розпаралелення p та значень $(x_a > x_s)$ зростає нелінійно з ростом (k, n) до максимального значення у випадку $k \approx n$, після чого зменшується (табл.7). Відтак для кожної комбінації значень (n, k, x_a, x_s) є відповідний показник розпаралелення p , для якого запропонований спосіб дає максимальне відносне прискорення обчислень. В середньому для типових значень (n, k, p, x_a, x_s) запропонований спосіб забезпечує прискорення обчислень в блоці прийняття рішень МВА на 40,6%.

Таблиця 7.

Відносне прискорення обчислень $g = S_p(\alpha_1, p) / S_p(\alpha_2, p)$, де $\alpha = \alpha_1$ або $\alpha = \alpha_2$, $p=4$, $x_a=10$, $x_s=8$.

(g – розрахунок, g^* – оцінка отримана експериментально)

	k=2		k=3		k=4		k=5		k=6		k=7		k=8		k=9		k=10	
	g	g*	g	g*	g	g*	g	g*	g	g*	g	g*	g	g*	g	g*	g	g*
n=2	1.27	1.26	1.24	1.22	1.22	1.21	1.20	1.18	1.18	1.17	1.17	1.15	1.16	1.14	1.15	1.13	1.14	1.13
n=3	1.31	1.30	1.44	1.43	1.40	1.39	1.38	1.37	1.35	1.33	1.32	1.31	1.30	1.29	1.29	1.28	1.27	1.26
n=4	1.28	1.26	1.52	1.50	1.57	1.55	1.53	1.52	1.49	1.47	1.46	1.44	1.43	1.41	1.41	1.40	1.39	1.37
n=5	1.26	1.24	1.48	1.45	1.67	1.66	1.67	1.65	1.62	1.61	1.59	1.58	1.55	1.53	1.52	1.51	1.49	1.47

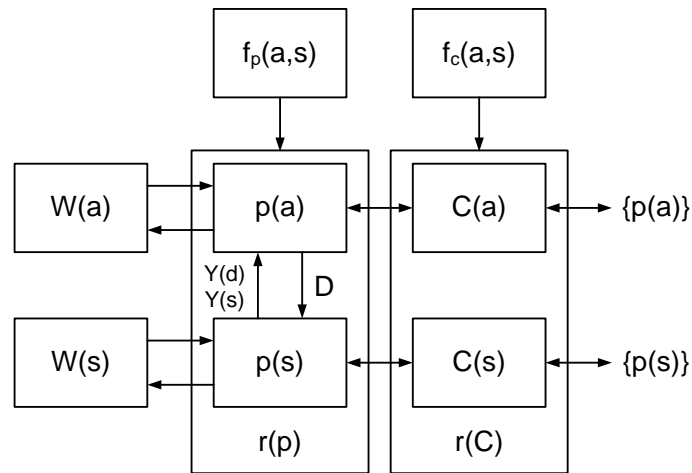


Рис. 10. Схема функціонального узгодження методів організації ВО-процесів та методів просторової самоорганізації МВА

Розв'язано задачу активних сукупних вимірювань колективом МВА на основі багатофункціонального методу визначення параметрів водного середовища. Розроблено відповідний метод організації адаптивних ВО-процесів. Розв'язано задачу рівномірного оточення зони збурень колективом МВА. Розроблено методи організації адаптивних ВО-процесів в задачі рівномірного оточення зони збурень колективом автономних МВА. Зокрема запропоновано нові алгоритми пошуку границі зони збурень колективом МВА, нові алгоритми руху МВА та рівномірного розподілення МВА вздовж границі зони збурень. Розв'язано задачу рівномірного розподілу обмеженої території колективом МВА. Розроблено метод організації адаптивних ВО-процесів в задачах рівномірного розподілу обмеженої території колективом автономних МВА на основі принципів ігрової координації багатоагентних систем.

У **п'ятому розділі** наведено результати практичної реалізації методів організації адаптивних ВО-процесів в АРС. Розроблено автономну розподілену систему моніторингу навколишнього середовища на основі інтелектуальних агентів. Структурна схема (рис.11) бортової системи первинної обробки даних та керування давачами інтелектуального агента містить блок управління, в якому реалізовано метод структурної адаптації ВО-процесів. Інтелектуальні агенти об'єднуються у складі вимірювально-обчислювальної мережі, яка є фізичним втіленням автономної системи моніторингу навколишнього середовища. В рамках колективної поведінки інтелектуальних агентів системи моніторингу реалізується відповідна схема організації адаптивних ВО-процесів.

Розроблено автономну розподілену систему виявлення та відстеження порушників (СВВП) на основі бездротової сенсорної мережі з використанням методів організації адаптивних ВО-процесів та технології багатоагентних систем. АРС виявлення та відстеження порушників реалізована у вигляді колективу інтелектуальних вартових агентів здатних самостійно вирішувати різні за змістом оптимізаційні задачі, що виникають під час роботи системи, за умов локальної обмеженої інформаційної взаємодії вартових агентів та відсутності єдиного центру управління. Розроблений прототип СВВП складається з наступних основних

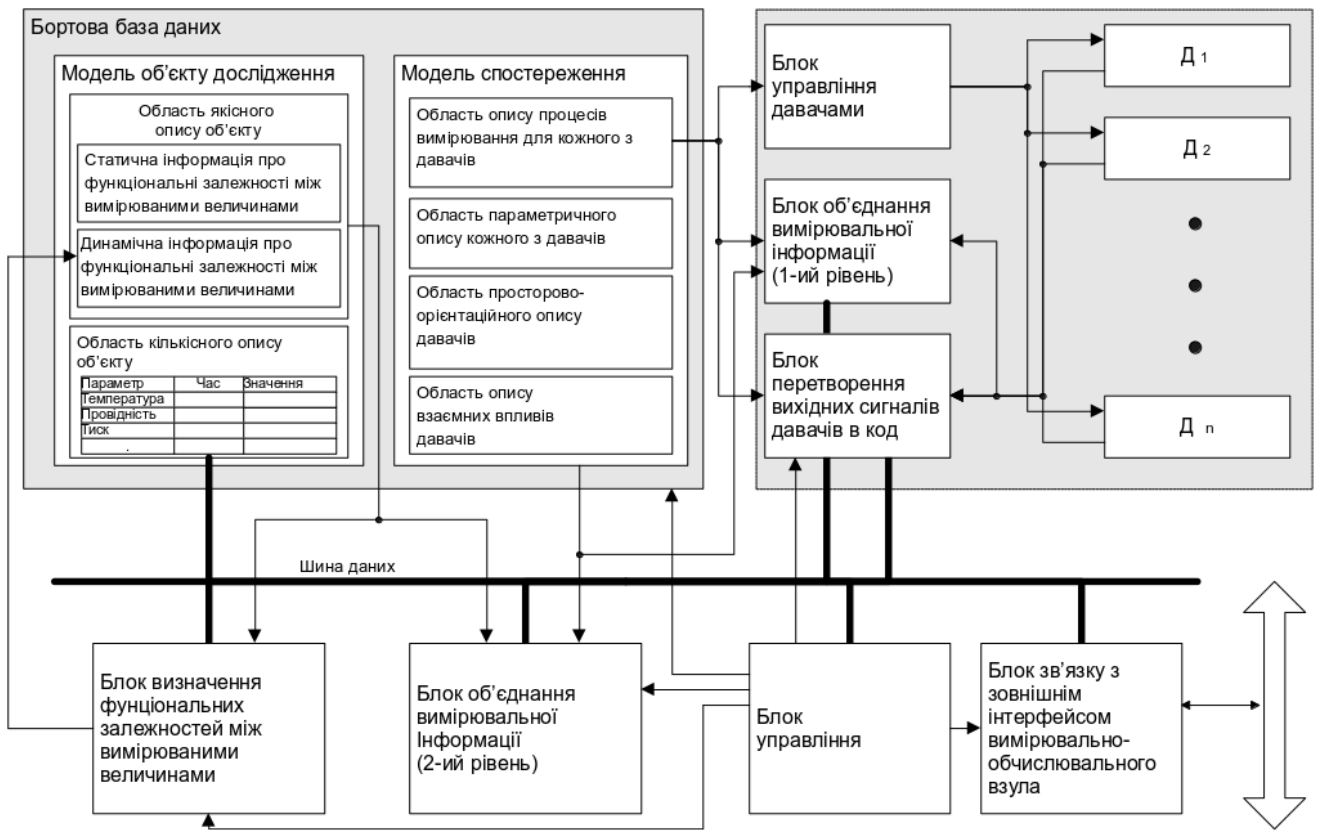


Рис.11. Структурна схема бортової системи первинної обробки даних та керування датчиками інтелектуального агента автономної розподіленої системи моніторингу навколишнього середовища

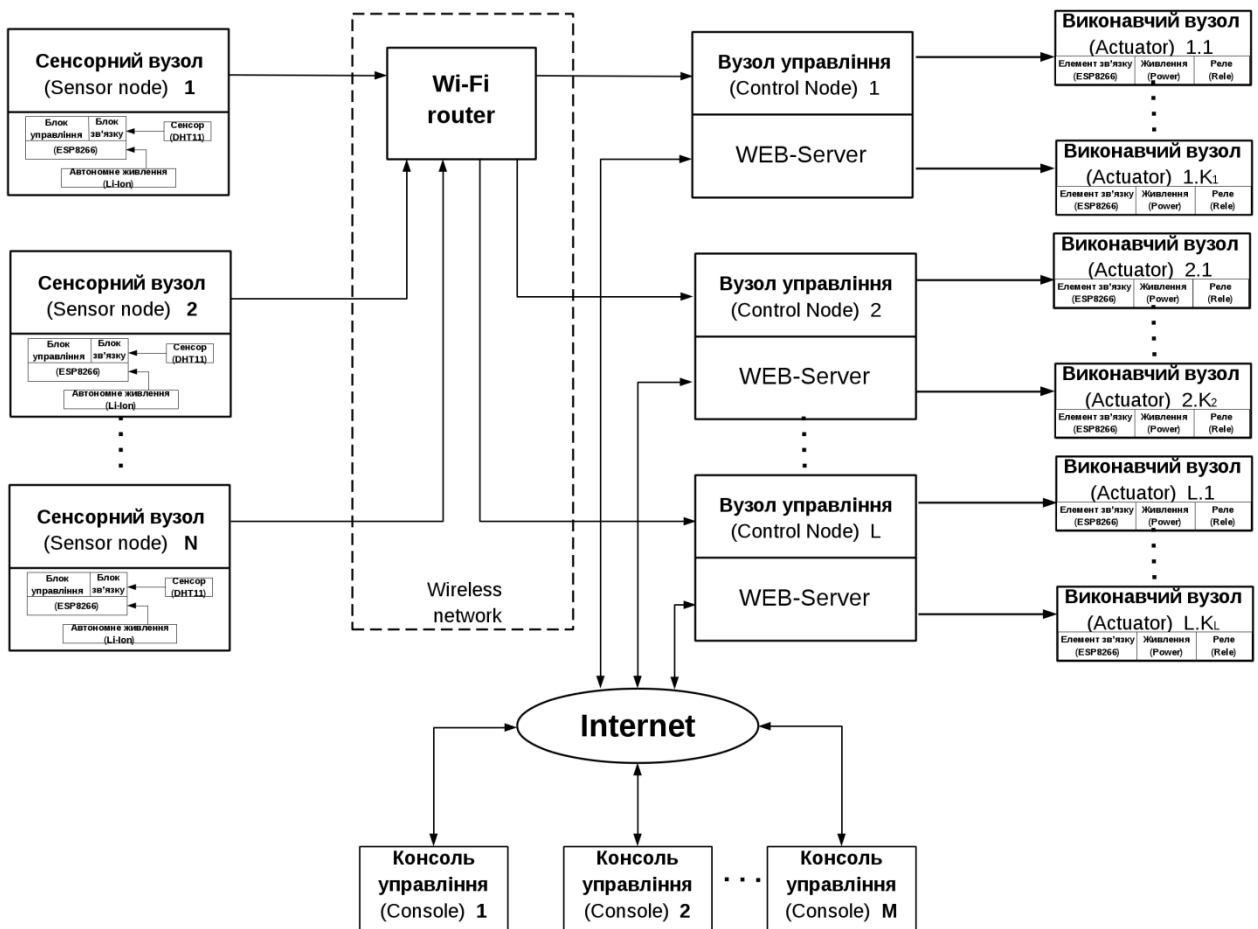


Рис.12. Розгорнута структурна схема СВВП

компонентів: сенсорні вузли, вузли управління, виконавчі вузли, консолі управління та середовище передачі даних (рис.12). При цьому 1) сенсорний вузол містить давачі фізичних величин (сенсори), Wi-Fi-модуль бездротового зв'язку (ESP8266) та літій-іонний акумулятор для забезпечення автономної роботи; 2) виконавчий вузол містить контролер (Arduino UNO) для керування виконавчими системами, Wi-Fi модуль бездротового зв'язку (ESP8266) та літій-іонний акумулятор; 3) середовище передачі даних реалізовано на основі одного або декількох маршрутизаторів мережі Wi-Fi з можливістю доступу до мережі Інтернет; 4) можливість віддаленого доступу до СВВП з консолей управління реалізована на основі web-серверів, які розміщено на відповідних вузлах управління.

Розроблено автономну децентралізовану систему моніторингу комп'ютерної мережі, яка складається з колективу програмних агентів, кожний з яких здатний працювати в двох режимах: 1) збір інформації про комп'ютерну мережу; 2) надання користувачу доступу до зібраної усіма агентами інформації та здійснення команд управління системою моніторингу. Реалізовані алгоритми функціонування програмних агентів дозволяють отримувати заданий об'єм інформації про роботу мережі при мінімально можливих витратах мережних та обчислювальних ресурсів. В роботі агентів системи моніторингу комп'ютерної мережі реалізовано запропоновані методи організації адаптивних ВО-процесів.

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано наукову задачу розроблення нових методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах на основі принципів децентралізації та самоорганізації. При цьому одержано такі основні наукові та практичні результати:

1. Проведено аналіз проблеми організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах та відомих методів організації адаптивних ВО-процесів. В результаті аналізу визначено недоліки відомих методів організації адаптивних ВО-процесів та виявлено декілька основних напрямків вдосконалення та розвитку цих методів.

2. Розроблено модель організації адаптивних ВО-процесів в задачах автономних розподілених досліджень, в якій на множині джерел інформації, що характеризується деякою попередньо невідомою структурою внутрішніх зв'язків розміщується колектив адаптивних ВО-процесів, кожний з яких реалізує поведінку відповідного автономного вимірювального агента (ВА).

3. Розроблено метод структурної адаптації ВО-процесів на основі машинного навчання блоку прийняття рішень щодо вибору дій на структурному та підпорядкованому йому функціональному рівні, який забезпечує більш ефективний розподіл вимірювальних та обчислювальних ресурсів, більш високу надійність та живучість підсистем збору інформації АРС. Зокрема середня кількість зібраної інформації за один крок для МСА на 23.2% більше ніж для МПА. За надійністю роботи МСА переважає МПА в середньому на 21.1%. Усереднений показник живучості для МСА більший ніж для МПА на 18.4%. Разом з тим кількість обчислювальних витрат на роботу МСА в середньому більше на 42.3% ніж на роботу МПА.

4. Розроблено метод координації адаптивних ВО-процесів на основі відкладеної у часі інформаційної взаємодії у розподіленому координаційному просторі шляхом передавання та асинхронної реплікації координуючих повідомлень із заданим часом зберігання, з використанням запропонованого набору локальних правил зміни стану координаційного простору, чим досягається, взаємне виключення при виборі дослідницьких дій та стійкість координації до відмов ВО-процесів і втрат координуючих повідомлень. Розроблено спосіб локального управління адаптивним ВО-процесом на основі методу координації та відповідний алгоритм.

5. Розроблено метод децентралізованого управління адаптивними ВО-процесами в АРС на основі принципу врівноваження та навчання з підкріпленням за методом нормованої експоненційної функції, який на відміну від відомих дозволяє організувати автономні розподілені дослідження за умов динамічних змін кількості ВО-процесів та ненадійної обмеженої інформаційної взаємодії між ВО-процесами. В результаті дослідження та моделювання встановлено, що використання методу нормованої експоненційної функції забезпечує більш ефективний пошук рішення у порівнянні з методом адаптивного випадкового пошуку (в середньому на 28.3%). Розроблено модель децентралізованого управління ВО-процесами на основі принципу інтерполяції (інтерполяційну модель колективної поведінки ВА) та модель децентралізованого управління ВО-процесами на основі принципу зменшення ентропії (ентропійну модель колективної поведінки ВА).

6. Удосконалено спосіб функціонального узгодження методів організації адаптивних ВО-процесів та методів просторової самоорганізації мобільних вимірювальних агентів (МВА) шляхом паралельного виконання відповідного ВО-процесу та процесу управління переміщенням МВА з використанням запропонованого протоколу їх взаємодії та алгоритму планування паралельного виконання, що дає змогу прискорити обчислення в блоці прийняття рішень МВА в середньому на 40,6%. Запропоновано розв'язки задач колективної поведінки МВА.

7. Розроблено автономну розподілену систему моніторингу навколишнього середовища на основі інтелектуальних агентів з використанням запропонованих методів організації адаптивних ВО-процесів. Розроблено структуру автономного інтелектуального агента системи екологічного моніторингу. Розроблено автономну розподілену систему виявлення та відстеження порушників та прототипи її сенсорних і виконавчих вузлів. Розроблено автономну децентралізовану систему моніторингу комп'ютерної мережі у складі колективу програмних агентів, в роботі яких реалізовано запропоновані методи організації адаптивних ВО-процесів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Golembo V. A. Approaches to design the multifunctional sensor system for determination of water environment parameters / V. A. Golembo, A. U. Botchkaryov // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 1999. – Vol. 76, iss.1/3. – P. 305–309.

2. Golembo V. Applying the concepts of multi-agent approach to the distributed autonomous explorations / V. Golembo, A. Botchkaryov // *Information Science and Computing*. – 2009. – Vol. 3, № 13 : Intelligent information and engineering systems. – P. 136–142.

3. Бочкарьов О. Ю. Система розподілених контактних вимірювань на основі автономних мобільних інтелектуальних агентів / О. Ю. Бочкарьов, В. А. Голембо // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2001. – № 437: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 14–20.

4. Бочкарьов О. Ю. Вирішення задачі механічного врівноваження колективом мобільних агентів / О. Ю. Бочкарьов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2002. – № 463: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 14–19.

5. Бочкарьов О. Ю. Моделі колективної поведінки вимірювальних агентів / О. Ю. Бочкарьов, В. А. Голембо // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2002. – № 463: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 19–27.

6. Бочкарьов О. Ю. Інтерполяційна модель колективної поведінки мобільних агентів вимірювально-обчислювальної мережі / О. Ю. Бочкарьов, В. А. Голембо // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2003. – № 492: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 21–27.

7. Мельник А. О. Нові принципи побудови вимірювально-обчислювальних мереж на основі інтелектуальних агентів / А. О. Мельник, В. А. Голембо, О. Ю. Бочкарьов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2003. – № 492: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 100–106.

8. Бочкарьов О. Ю. Параметрична самоорганізація колективу автономних вимірювальних агентів: задача оточення зони збурень / О. Ю. Бочкарьов, В. А. Голембо, Т. О. Грицуляк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2004. – № 523: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 6–15.

9. Бочкарьов О. Ю. Колективна поведінка мобільних інтелектуальних агентів в задачах автономних розподілених досліджень / О. Ю. Бочкарьов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2005. – № 546: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 12–17.

10. Проблема самоорганізації багатоагентної системи виявлення та відстеження порушників / А. О. Мельник, В. А. Голембо, О. Ю. Бочкарьов, О. П. Кусьпісь // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2005. – № 548: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. – С. 11–15.

11. Голембо В. А. Задача формування індивідуальних зон відповідальності колективом мобільних агентів / В. А. Голембо, О. Ю. Бочкарьов, А. М. Ціж // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2006. – № 573: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 62–67.

12. Голембо В. А. Проблема алгоритмічного забезпечення колективної поведінки автономних мобільних агентів в задачах просторової самоорганізації / В. А. Голембо, О. Ю. Бочкарьов, Х. Р. Попадюк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2007. – № 603: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 26–30.

13. Автономна адаптивна система виявлення та відстеження порушників / А. О. Мельник, В. А. Голембо, О. Ю. Бочкарьов, О. П. Кусьпісь // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2007. – № 603: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 87–93.

14. Бочкарьов О. Ю. Колективна поведінка мобільних агентів у задачах рівномірного розподілу обмеженої території / О. Ю. Бочкарьов, В. А. Голембо, А. М.

- Ціж // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2008. – № 630: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 31–35.
15. Голембо В. Проблема організації узгоджених колективних дій автономних мобільних підводних апаратів / В. Голембо, О. Бочкар'юв, А. Гребеняк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – № 650: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 168–173.
16. Бочкар'юв О. Ю. Структурна адаптація автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем / О. Ю. Бочкар'юв // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2010. – № 688: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 16–22.
17. Бочкар'юв О. Ю. Самоорганізація автономних розподілених систем у задачах прийняття рішень в умовах невизначеності / О. Ю. Бочкар'юв, В. А. Голембо // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2010. – № 688: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 23–30.
18. Голембо В. А. Шляхи покращення медіанного алгоритму рівномірного оточення зони збурень колективом автономних мобільних агентів / В. А. Голембо, О. Ю. Бочкар'юв, Т. М. Січ // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 717: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 17–23.
19. Бочкар'юв О. Ю. Проблема організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів у автономних розподілених системах / О. Ю. Бочкар'юв // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2012. – № 745: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 20–26.
20. Бочкар'юв О. Ю. Автономні розподілені системи з елементами самоорганізації: проблеми та напрямки розвитку / О. Ю. Бочкар'юв, В. А. Голембо // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2012. – № 745: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 26–32.
21. Бочкар'юв О. Ю. Метод координації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів на основі відкладеної у часі інформаційної взаємодії / О. Ю. Бочкар'юв, В. А. Голембо // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2014. – № 806: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 22–26.
22. Бочкар'юв О. Ю. Використання інтелектуальних технологій збору даних у автономних кіберфізичних системах / О. Ю. Бочкар'юв, В. А. Голембо // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2015. – № 830: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 7–11.
23. Голембо В. Підходи до побудови концептуальних моделей кіберфізичних систем / В. Голембо, О. Бочкар'юв // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2017. – № 864: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 168–178.
24. Botchkariov A., Collective behavior of mobile agents solving distributed sensing task / A. Botchkariov, V. Golemba // Proceedings of the 1st International Conference «Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application» (ACSN-2003), Lviv, Ukraine, September 24-26, 2003. – P. 123-124.
25. Botchkariov A. Autonomous mobile explorers' team: problem of self-organization / A. Botchkariov // Proceedings of the 2nd International Conference «Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application» (ACSN-2005), Lviv, Ukraine, September 21-23, 2005. – P. 106-108.

26. Botchkariov A., Locating and surrounding parametric anomalies in environment by team of autonomous mobile explorers / A. Botchkariov, V. Golembo, T. Grytsulyak // Proceedings of the 2nd International Conference «Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application» (ACSN-2005), Lviv, Ukraine, September 21-23, 2005. – P. 109-111.

27. Botchkaryov A., CyberCromlech: A new framework for collective behaviour game experiments / A. Botchkaryov, S. Kovala // Proceedings of 20th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS-2006), Bonn, Sankt Augustin, Germany, 28-31 May, 2006. – P. 540-545.

28. Melnyk A., Multiagent approach to the distributed autonomous explorations / A. Melnyk, V. Golembo, A. Bochkaryov // Proceedings of NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS-2007), Edinburgh, UK, 5–8 August, 2007. – P. 606-610.

29. Botchkaryov A., Concept of Multi-agent Conditional Interplay / A. Botchkaryov, V. Golembo // Proceeding of the 3rd International Conference «Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application» (ACSN-2007), Lviv, Ukraine, September 20-22, 2007. – P. 94-96.

30. Botchkariov A., Methods of spatial self-organization of mobile agents' collective: ways of application / A. Botchkariov, V. Golembo, K. Popaduk // Proceeding of the 3rd International Conference «Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application» (ACSN-2007), Lviv, Ukraine, September 20-22, 2007. – P. 107-108.

31. Development of multi-agent systems for intruders' detection and tracking / A. Melnyk, V. Golembo, A. Botchkariov, O. Kuspis // Proceeding of the 3rd International Conference «Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application» (ACSN-2007), Lviv, Ukraine, September 20-22, 2007. – P. 109-110.

32. Botchkaryov A., Concept of Multi-agent Conditional Interplay / A. Botchkaryov, S. Kovala // Proceedings of 10th International Conference on Computer Modelling and Simulation (EUROSIM/UKSim-2008), Cambridge, UK, 1–3 April, 2008. – P. 100-105.

33. Бочкаръов О. Ю. Проблема структурної адаптації автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем / О. Ю. Бочкаръов // Матеріали 4-ї Міжнародної конференції «Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання» (ACSN-2009), Львів, 9-11 листопада, 2009. – С. 221-224.

34. Голембо В. А., Медіанний алгоритм рівномірного оточення зони збурень колективом автономних мобільних агентів / В. А. Голембо, О. Ю. Бочкаръов, Т. М. Січ // Матеріали 5-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання» (ACSN-2011), Львів, 29 вересня - 1 жовтня, 2011. – С. 259-262.

35. Botchkaryov A., A new approach to coordinate multi-agent interaction and decision making / A. Botchkaryov, S. Kovala // Матеріали 4-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси» (ПРТК-2011), Київ, 23-25 травня, 2011. – С. 272-275.

36. Голембо В. А., Підходи до вирішення проблеми самоорганізації колективу автономних мобільних підводних апаратів / В. А. Голембо, О. Ю. Бочкаръов // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Підводна техніка і технологія» (ПТТ-2012), Миколаїв, 30 – 31 жовтня, 2012. – С. 121-127.

37. Botchkaryov A., Self-organization in autonomous distributed systems: new approaches and perspectives / A. Botchkaryov, V. Golembo // Proceeding of the 6th International Conference «Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application» (ACSN-2013), Lviv, Ukraine, September 16–18, 2013. – P. 243-246.

38. Бочкарьов О. Ю., Використання технологій інтелектуального збору даних у кіберфізичних системах / О. Ю. Бочкарьов, В. А. Голембо // Матеріали Першого наукового семінару «Кіберфізичні системи: досягнення та виклики», НУ «Львівська політехніка», Львів, 25-26 червня, 2015. – С. 24-27.

39. Бочкарьов О. Ю. Організація адаптивних процесів збору інформації у мобільних кіберфізичних системах / О. Ю. Бочкарьов // Матеріали Другого наукового семінару «Кіберфізичні системи: досягнення та виклики», НУ «Львівська політехніка», Львів, 21-22 червня, 2016. – С. 62-67.

40. Бочкарьов О. Ю., Бездротова мережа сенсорних та виконавчих вузлів у складі кіберфізичної системи / О. Ю. Бочкарьов, Ю. А. Крайкін // Матеріали Третього наукового семінару «Кіберфізичні системи: досягнення та виклики», НУ «Львівська політехніка», Львів, 13-14 червня, 2017. – С. 81-90.

АНОТАЦІЯ

Бочкарьов О.Ю. Організація адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Національний університет "Львівська політехніка" Міністерства освіти і науки України, Львів, 2019.

У дисертації розв'язано наукову задачу розроблення нових методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів (ВО-процесів) в автономних розподілених системах (АРС) на основі принципів децентралізації та самоорганізації. Розроблено метод структурної адаптації ВО-процесів на основі машинного навчання блоку прийняття рішень щодо вибору дій на структурному та підпорядкованому йому функціональному рівні, який забезпечує більш ефективний розподіл вимірювальних та обчислювальних ресурсів, більш високу надійність та живучість підсистем збору інформації АРС. Розроблено метод координації адаптивних ВО-процесів на основі відкладеної у часі інформаційної взаємодії у розподіленому координаційному просторі шляхом передавання та асинхронної реплікації координуючих повідомлень із заданим часом зберігання, чим досягається, взаємне виключення при виборі дослідницьких дій та стійкість координації до відмов ВО-процесів і втрат координуючих повідомлень. Розроблено метод децентралізованого управління адаптивними ВО-процесами в АРС на основі принципу врівноваження та навчання з підкріпленням за методом нормованої експоненційної функції, який дозволяє організувати автономні розподілені дослідження за умов динамічних змін кількості ВО-процесів та ненадійної обмеженої інформаційної взаємодії між ВО-процесами. Удосконалено спосіб функціонального узгодження методів організації адаптивних ВО-процесів та методів просторової самоорганізації мобільних вимірювальних агентів (МВА) шляхом паралельного виконання відповідного ВО-процесу та процесу управління

переміщенням МВА з використанням запропонованого протоколу їх взаємодії та алгоритму планування паралельного виконання, що дає змогу прискорити обчислення в блоці прийняття рішення МВА.

Ключові слова: адаптивний вимірювально-обчислювальний процес, автономна розподілена система, структурна адаптація, машинне навчання, самоорганізація.

АННОТАЦІЯ

Бочкарёв А.Ю. Организация адаптивных измерительно-вычислительных процессов в автономных распределенных системах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. - Национальный университет "Львівська політехніка" Министерства образования и науки Украины, Львов, 2019.

В диссертации решена научная задача разработки новых методов организации адаптивных измерительно-вычислительных процессов (ИВ-процессов) в автономных распределенных системах (АРС) на основе принципов децентрализации и самоорганизации. Разработан метод структурной адаптации ИВ-процессов на основе машинного обучения блока принятия решений по выбору действий на структурном и подчиненном ему функциональном уровне, который обеспечивает более эффективное распределение измерительных и вычислительных ресурсов, более высокую надежность и живучесть подсистем сбора информации АРС. Разработан метод координации адаптивных ИВ-процессов на основе отложенного во времени информационного взаимодействия в распределенном координационном пространстве путем передачи и асинхронной репликации координирующих сообщений с заданным временем хранения, чем достигается взаимное исключение при выборе исследовательских действий и устойчивость координации к отказам ИВ-процессов и потерям координирующих сообщений. Разработан метод децентрализованного управления адаптивными ИВ-процессами в АРС на основе принципа уравнивания и обучения с подкреплением методом нормированной экспоненциальной функции, который позволяет организовать автономные распределенные исследования в условиях динамических изменений количества ИВ-процессов и ненадежного ограниченного информационного взаимодействия между ИВ-процессами. Усовершенствован способ функционального согласования методов организации адаптивных ИВ-процессов и методов пространственной самоорганизации мобильных измерительных агентов (МВА) путем параллельного выполнения соответствующего ИВ-процесса и процесса управления перемещением МВА с использованием предложенного протокола их взаимодействия и алгоритма планирования параллельного выполнения, что позволяет ускорить вычисления в блоке принятия решения МВА.

Ключевые слова: адаптивный измерительно-вычислительный процесс, автономная распределенная система, структурная адаптация, машинное обучение, самоорганизация.

ABSTRACT

Botchkaryov A.Yu. Organization of adaptive measuring and computing processes in autonomous distributed systems. – The manuscript.

Thesis for scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 05.13.05 – Computer Systems and Components. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

In the thesis, the scientific task of developing new methods of organizing adaptive measuring and computing processes (MC-processes) in autonomous distributed systems (ADS) on the basis of the principles of decentralization and self-organization has been solved. The analysis of the problem of organizing adaptive MC-processes in autonomous distributed systems and known methods of organizing adaptive MC-processes has been carried out. As a result of the analysis, the shortcomings of the known methods of organizing adaptive MC-processes have been identified and several main directions for improving and developing these methods have been proposed. A model has been developed for the organization of adaptive MC-processes in autonomous distributed research problems, in which a set of adaptive MC-processes is located on a set of information sources characterized by some previously unknown structure of internal relations. Each MC-process implements the behavior of the corresponding autonomous measuring agent.

A method of structural adaptation of MC-processes based on machine learning of the decision block on the choice of actions at the structural and subordinate functional level has been developed, which provides a more efficient distribution of measuring and computing resources, higher reliability and survivability of the ADS information collection subsystems. A method has been developed for coordinating adaptive MC-processes based on information interaction deferred in time in a distributed coordination space by transmitting and asynchronously replicating coordinating messages with a given retention time, thereby achieving mutual exclusion when choosing research actions and sustainability coordination to failures of MC-processes and loss of coordinating messages. A method for local control of an adaptive MC-process based on the coordination method and a corresponding algorithm has been developed.

A method of decentralized control of adaptive MC-processes in ADS is developed on the basis of the principle of balancing and reinforcement learning supported by the method of normalized exponential function, which allows you to organize autonomous distributed research in the context of dynamic changes in the number of MC-processes and unreliable limited information interaction between them. A model of decentralized control of MC-processes was developed on the basis of the interpolation principle (an interpolation model of collective behavior of measuring agents) and a model of decentralized control of MC-processes based on the principle of reducing entropy (an entropy model of collective behavior of measuring agents).

The method of functional coordination of methods for organizing adaptive MC-processes and methods of spatial self-organization of mobile measuring agents (MMA) has been improved by parallel execution of the corresponding software process and MMA movement control process using the proposed protocol of their interaction and parallel execution planning algorithm, which allows accelerating the calculations in the decision making block of MMA. The solutions to the problems of collective behavior of MMA are

proposed.

An autonomous distributed environmental monitoring system based on intelligent agents using the proposed methods of organizing adaptive MC-processes has been developed. The structure of an autonomous intelligent agent of the environmental monitoring system has been developed. An autonomous distributed system for detecting and tracking intruders and prototypes of its sensor and actuator nodes has been developed. An autonomous decentralized system for monitoring a computer network has been developed. The system consists of a collective of software agents, in which the proposed methods for organizing adaptive MC-processes are implemented.

Keywords: adaptive measuring and computing process, autonomous distributed system, structural adaptation, machine learning, self-organization.