

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БОЧКАРЬОВ ОЛЕКСІЙ ЮРІЙОВИЧ

УДК 004.75:004.896

ДИСЕРТАЦІЯ

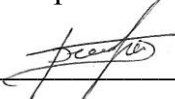
**ОРГАНІЗАЦІЯ АДАПТИВНИХ ВИМІРЮВАЛЬНО-
ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОНОМНИХ
РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ**

05.13.05 – Комп’ютерні системи та компоненти

05 – Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Бочкарьов О.Ю.

Науковий керівник:

Голембо Вадим Адольфович

кандидат технічних наук, доцент

***Ідентичність всіх примірників дисертації
ЗАСВІДЧУЮ:***

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.08*

 /Я.Т. Луцик/

Львів-2019

АНОТАЦІЯ

Бочкарьов О.Ю. Організація адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах. – Кваліфікаційна наукова праця 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», Львів, 2019.

Дисертація присвячена розв'язанню актуального науково-технічного завдання розроблення нових методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах на основі принципів децентралізації та самоорганізації.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано мету дослідження та науково-технічні завдання, необхідні для її досягнення, показано зв'язок дослідження з науковими програмами та темами, наведено наукову новизну отриманих результатів, їх практичну цінність та особистий внесок здобувача, надано інформацію про апробацію результатів роботи.

В першому розділі проведено аналіз проблеми організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах та відомих методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів. В результаті аналізу визначено недоліки відомих методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів та виявлено декілька основних напрямків вдосконалення та розвитку цих методів. Розглянуто особливості побудови та функціонування автономних розподілених систем, запропоновано узагальнений опис автономної розподіленої системи на основі принципів децентралізації та самоорганізації.

У другому розділі розроблено модель організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в задачах автономних розподілених досліджень, в якій на множині джерел інформації, що характеризується деякою попередньо

невідомою структурою внутрішніх зв'язків розміщується колектив адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів, кожний з яких реалізує поведінку відповідного автономного вимірювального агента.

Розроблено метод структурної адаптації вимірювально-обчислювальних 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 автономної розподіленої системи у порівнянні з методами параметричної адаптації. Зокрема за результатами експериментальних досліджень середня кількість зібраної інформації за один крок з використанням методу структурної адаптації на 23.2% більше ніж у випадку використання методів параметричної адаптації. Разом з тим кількість обчислювальних витрат на роботу методу структурної адаптації в середньому більше на 42.3% ніж на роботу методів параметричної адаптації.

Досліджено надійність роботи методу структурної адаптації за допомогою коефіцієнта збереження ефективності для різних значень інтенсивності потоку відмов вимірювально-обчислювальних процесів. За допомогою коефіцієнту швидкості відновлення для різних значень відносних одночасних раптових відмов досліджено живучість колективу вимірювально-обчислювальних процесів, організованих за методом структурної адаптації. За надійністю роботи метод структурної адаптації переважає методи параметричної адаптації в середньому на 21.1%. Усереднений показник живучості для методу структурної адаптації більший ніж для методів параметричної адаптації на 18.4%.

Розроблено метод координації адаптивних вимірювально-обчислювальних 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 вимірювально-обчислювальних процесів і втрат координуючих повідомлень. Розроблено спосіб локального управління адаптивним вимірювально-обчислювальним процесом на основі методу координації та відповідний алгоритм.

В третьому розділі розроблено модель децентралізованого управління вимірювально-обчислювальними процесами на основі принципу врівноваження, за допомогою якої досліджено проблему узгодження спільних колективних дій з точки зору пошуку ефективної схеми взаємодоповнення дій окремих вимірювально-обчислювальних процесів за умов відсутності центру управління.

Розроблено метод децентралізованого управління адаптивними вимірювально-обчислювальними процесами на основі принципу врівноваження та навчання з підкріпленням за методом нормованої експоненційної функції, який дозволяє організувати автономні розподілені дослідження за умов динамічних змін кількості вимірювально-обчислювальних процесів та ненадійної обмеженої інформаційної взаємодії між ними. В результаті дослідження та моделювання роботи розробленого методу децентралізованого управління встановлено, що використання методу нормованої експоненційної функції забезпечує більш ефективний пошук рішення у порівнянні з методом адаптивного випадкового пошуку (в середньому на 28.3%). За допомогою коефіцієнту збереження ефективності отримано оцінку залежності роботи розробленого методу децентралізованого управління від зміни кількості вимірювально-обчислювальних процесів та зміни схеми інформаційної взаємодії між вимірювально-обчислювальними процесами.

Розроблено модель децентралізованого управління вимірювально-обчислювальними 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 вимірювально-обчислювальними процесами на основі принципу зменшення ентропії (ентропійну модель колективної поведінки вимірювальних агентів) для

дослідження проблеми пошуку найкращого розміщення вимірювальних агентів на множині випадкових середовищ.

В четвертому розділі удосконалено спосіб функціонального узгодження методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів та методів просторової самоорганізації мобільних вимірювальних агентів шляхом паралельного виконання відповідного вимірювально-обчислювального процесу та процесу управління переміщенням мобільного вимірювального агента з використанням запропонованого протоколу їх взаємодії та алгоритму планування паралельного виконання, що дозволяє прискорити обчислення в блоці прийняття рішення мобільного вимірювального агента в середньому на 40,6%.

Розв'язано задачу активних сукупних вимірювань колективом мобільних вимірювальних агентів на основі багатofункціонального методу визначення параметрів водного середовища. Розв'язано задачу рівномірного оточення зони збурень колективом мобільних вимірювальних агентів. Розроблено методи організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в задачі рівномірного оточення зони збурень колективом автономних мобільних вимірювальних агентів. Розв'язано задачу рівномірного розподілу обмеженої території колективом мобільних вимірювальних агентів.

В п'ятому розділі розглянуто реалізацію методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах. Розроблено автономну розподілену систему моніторингу навколишнього середовища на основі інтелектуальних агентів з використанням запропонованих методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів. Розроблено автономну розподілену систему виявлення та відстеження порушників на основі бездротової сенсорної мережі з використанням методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів та технології багатоагентних систем. Розроблено автономну децентралізовану систему моніторингу комп'ютерної мережі у складі колективу програмних агентів, в роботі яких реалізовано запропоновані методи організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів.

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

ABSTRACT

Botchkaryov A. Yu. Organization of adaptive measuring and computing processes in autonomous distributed systems. – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

The thesis for a candidate of technical science (Ph.D.) degree in specialty 05.13.05 «Computer systems and components». – Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, 2019.

The thesis is devoted to solving the actual scientific and technical problem of developing new methods of organizing adaptive measuring and computing processes in autonomous distributed systems based on the principles of decentralization and self-organization.

The introduction substantiates the relevance of the topic of the dissertation research, formulates the purpose of the research and the scientific and technical problems necessary for its achievement, shows the relation between the research and scientific programs and themes, presents the scientific novelty of the obtained results, their practical value and the individual contribution of the applicant, gives information about approbation of the scientific results.

The first section analyzes the problem of organizing adaptive measuring and computing processes in autonomous distributed systems and the known methods of organizing adaptive measuring and computing processes. As a result of the analysis, the shortcomings of the known methods of organizing adaptive measuring and computing processes are identified and several main directions for improving and developing these methods are identified. The features of the construction and operation of autonomous distributed systems are considered, a generalized description of an autonomous

distributed system based on the principles of decentralization and self-organization is proposed.

In the second section, a model for the organization of adaptive measuring and computing processes in tasks of autonomous distributed research is developed, in which a set of information sources is characterized by a certain previously unknown structure of internal connections.

A method of structural adaptation of measuring and computing processes has been developed based on machine learning of the decision block on the choice of actions at the structural and functional level subordinated to it, which provides a more efficient distribution of measuring and computing resources, higher reliability and survivability of information collection subsystems of an autonomous distributed system compared to methods of parametric adaptation. In particular, according to the results of experimental studies, the average amount of information collected in one step using the method of structural adaptation is 23.2% more than in the case of using the methods of parametric adaptation. At the same time, the amount of computational costs for the work of the structural adaptation method is on average 42.3% more than for the work of parametric adaptation methods.

The reliability of the work of the method of structural adaptation was studied using the efficiency preservation coefficient for different values of the failure rate of measuring and computing processes. Using the recovery rate coefficient for various values of relative simultaneous sudden failures, the survivability of a collective of measuring and computing processes organized by the method of structural adaptation has been investigated. In terms of reliability, the structural adaptation method exceeds the parametric adaptation methods by an average of 21.1%. The average survivability rate for the method of structural adaptation is greater than for methods of parametric adaptation by 18.4%.

A method for coordinating adaptive measuring and computing processes was developed on the basis of information interaction delayed in time in a distributed coordination space by transmitting and asynchronously replicating coordination messages with a given storage time using the proposed set of local rules for changing

the state of the coordination space, thereby achieving mutual exclusion when choosing research actions and stability of coordination to failures of measuring and computing processes and loss of coordination messages. A method of local control of an adaptive measuring and computing process based on the coordination method and the corresponding algorithm have been developed.

In the third section, a model of decentralized control of measuring and computing processes is developed based on the principle of balancing, which is used to study the problem of coordinating joint collective actions from the point of view of finding an effective scheme for complementing the actions of individual measuring and computing processes in the absence of a control center.

A method of decentralized control of adaptive measuring and computing processes based on the principle of balancing and reinforcement learning by the method of normalized exponential function (softmax) has been developed. As a result of research and modeling of the developed method of decentralized control, it has been established that the use of the method of the normalized exponential function provides a more effective search for a solution compared to the method of adaptive random search (by an average of 28.3%). Using the efficiency preservation coefficient, an estimate was obtained for the dependence of the work of the developed decentralized control method on the change in the number of measuring and computing processes and the change in the information interaction scheme between measuring and computing processes.

A model of decentralized control of measuring and computing processes was developed on the basis of the interpolation principle (an interpolation model of the collective behavior of measuring agents), with the help of which the problem of finding the best placement of measuring agents in the space of the object of study was investigated. A model of decentralized control of measuring and computing processes was developed based on the principle of entropy reduction (entropy model of collective behavior of measuring agents) to study the problem of finding the best placement of measuring agents on a set of random environments.

In the fourth section, the method of functional coordination of methods of organizing adaptive measuring and computing processes and methods of spatial self-

organization of mobile measuring agents by parallel execution of the corresponding measuring and computing process and the process of motion control of a mobile measuring agent using the proposed protocol of their interaction and the algorithm of parallel execution planning is improved. The method allows to speed up the calculations in the decision block of the mobile measuring agent by an average of 40.6%.

The problem of active cumulative measurements by a team of mobile measuring agents is solved on the basis of a multifunctional method for determining parameters of the water environment. The problem of uniform encirclement of the perturbation zone by a team of mobile measuring agents has been solved. Methods for the organization of adaptive measuring and computing processes in the task of uniformly surrounding a perturbation zone by a team of autonomous mobile measuring agents have been developed. The problem of uniform distribution of a bounded area by a team of mobile measuring agents has been solved.

The fifth section discusses the implementation of methods for organizing adaptive measuring and computing processes in autonomous distributed systems. An autonomous distributed environmental monitoring system based on intelligent agents using the proposed methods of organizing adaptive measuring and computing processes has been developed. An autonomous distributed system for detecting and tracking intruders based on a wireless sensor network using adaptive measurement and computing processes and multi-agent systems technology has been developed. An autonomous decentralized computer network monitoring system has been developed. The system consists of a collective of software agents, in which the proposed methods for organizing adaptive measuring and computing processes are implemented.

Key words: adaptive measuring and computing process, autonomous distributed system, structural adaptation, machine learning, intelligent agent, multiagent system, self-organization.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати 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'єв, А. Гребеняк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – № 650: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 168–173.

16. Бочкар'єв О. Ю. Структурна адаптація автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем / О. Ю. Бочкар'єв // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2010. – № 688: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 16–22.

17. Бочкар'єв О. Ю. Самоорганізація автономних розподілених систем у задачах прийняття рішень в умовах невизначеності / О. Ю. Бочкар'єв, 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'єв, Т. М. Січ // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 717: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 17–23.

19. Бочкар'єв О. Ю. Проблема організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів у автономних розподілених системах / О. Ю. Бочкар'єв // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2012. – № 745: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 20–26.

20. Бочкар'єв О. Ю. Автономні розподілені системи з елементами самоорганізації: проблеми та напрямки розвитку / О. Ю. Бочкар'єв, В. А. Голембо // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2012. – № 745: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 26–32.

21. Бочкар'єв О. Ю. Метод координації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів на основі відкладеної у часі інформаційної взаємодії / О. Ю. Бочкар'єв, В. А. Голембо // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2014. – № 806: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 22–26.

22. Бочкаръов О. Ю. Використання інтелектуальних технологій збору даних у автономних кіберфізичних системах / О. Ю. Бочкаръов, 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. Бочкаръов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2017. – № 864: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 168–178.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

24. Botchkariov A., Collective behavior of mobile agents solving distributed sensing task / A. Botchkariov, V. Golembo // 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. Kovela // 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. Botchkaryov // 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. Бочкар'єв // 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. Бочкар'єв О. Ю., Використання технологій інтелектуального збору даних у кіберфізичних системах / О. Ю. Бочкар'єв, В. А. Голембо // Матеріали Першого наукового семінару «Кіберфізичні системи: досягнення та виклики», НУ «Львівська політехніка», Львів, 25-26 червня, 2015. – С. 24-27.

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

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

ЗМІСТ

ВСТУП.....	19
1. ПРОБЛЕМА ОРГАНІЗАЦІЇ АДАПТИВНИХ ВИМІРЮВАЛЬНО- ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОНОМНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ.....	25
1.1. Підходи до розв’язку проблеми організації вимірювально- обчислювальних процесів в автономних розподілених системах	25
1.2. Аналіз моделей та методів організації адаптивних вимірювально- обчислювальних процесів в автономних розподілених системах	30
1.3. Аналіз принципів самоорганізації вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах	32
1.4. Постановка задачі організації адаптивних вимірювально- обчислювальних процесів в автономних розподілених системах	40
Висновки до розділу 1	43
2. СТРУКТУРНА АДАПТАЦІЯ ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОНОМНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ.....	44
2.1. Організація адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в задачах автономних розподілених досліджень	44
2.2. Розв’язок задачі організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів	51
2.3. Метод структурної адаптації вимірювально-обчислювальних процесів	58
2.4. Метод координації вимірювально-обчислювальних процесів на основі відкладеної у часі інформаційної взаємодії.....	75
2.5. Спосіб локального управління адаптивним вимірювально- обчислювальним процесом на основі методу координації.....	86
Висновки до розділу 2	89

3. МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ АДАПТИВНИМИ ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИМИ ПРОЦЕСАМИ	91
3.1. Децентралізоване управління вимірювально-обчислювальними процесами на основі принципу врівноваження	91
3.2. Інтерполяційна модель колективної поведінки вимірювальних агентів.....	97
3.3. Методи децентралізованого управління поведінкою вимірювальних агентів в інтерполяційній моделі	104
3.4. Ентропійна модель колективної поведінки вимірювальних агентів	107
Висновки до розділу 3	110
4. РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧ КОЛЕКТИВНОЇ ПОВЕДІНКИ МОБІЛЬНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ АГЕНТІВ	112
4.1. Функціональне узгодження методів організації адаптивних ВО-процесів та методів просторової самоорганізації мобільних вимірювальних агентів	112
4.2. Розв'язок задачі активних сукупних вимірювань колективом мобільних вимірювальних агентів	117
4.3. Розв'язок задачі рівномірного оточення зони збурень колективом мобільних вимірювальних агентів.....	129
4.4. Розв'язок задачі рівномірного розподілу обмеженої території колективом мобільних вимірювальних агентів	141
Висновки до розділу 4	149

5. РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ОРГАНІЗАЦІЇ АДАПТИВНИХ ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОНОМНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ.....	150
5.1. Автономна розподілена система моніторингу навколишнього середовища на основі інтелектуальних агентів	150
5.2. Автономна розподілена система виявлення та відстеження порушників на основі бездротової сенсорної мережі.....	153
5.3. Автономна децентралізована система моніторингу комп'ютерної мережі на основі програмних агентів.....	160
Висновки до розділу 5	176
ВИСНОВКИ.....	177
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	180
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	192
ДОДАТОК Б. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	198
ДОДАТОК В. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ СТРУКТУРНОЇ АДАПТАЦІЇ ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ.	206

ВСТУП

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 унеможлиблює 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 і 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 (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.

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 (Додаток Б.). 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 (Додаток Б.). 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» (Додаток Б.).

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 (Додаток А.), 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.

1. ПРОБЛЕМА ОРГАНІЗАЦІЇ АДАПТИВНИХ ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОНОМНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ

1.1. Підходи до розв'язку проблеми організації вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах

На даний час все більшої ваги набувають дослідження та розробки у галузі автономних розподілених систем, призначених для вирішення багатьох прикладних задач без участі людини шляхом прийняття рішень в умовах невизначеності. Головними тенденціями в цій галузі є подальше збільшення рівня автономності розподілених систем (їм передається все більше повноважень у прийнятті рішень) та збільшення надійності роботи АРС шляхом децентралізації управління (організації узгодженої спільної роботи вузлів системи за умов відсутності єдиного центру). Однак на цьому шляху виникає ціла низка складних проблем, пов'язаних з прийняттям рішень в умовах невизначеності та використанням ресурсу децентралізованого управління. Одною з таких проблем є проблема координації незалежних процесів прийняття рішень окремими вузлами в рамках єдиної АРС. Відтак в роботі розглядається актуальне питання розв'язання цієї проблеми шляхом розробки узагальненого підходу до вирішення задач координації спільних узгоджених дій вузлів АРС на основі принципів самоорганізації.

Автономні розподілені системи призначені для виконання поставлених перед ними завдань без участі людини (автономність) в ситуаціях, коли необхідно рознести окремі елементи (частини) системи в просторі об'єкта управління (розподіленість). АРС використовуються для вирішення задач в умовах нестачі інформації (невизначеності), коли розробнику (користувачу) не відомі наперед деякі параметри цих задач (наприклад, певні характеристики об'єкту управління або характер збурень, які виникають у середовищі, в якому розміщено АРС). Внаслідок цього вузлам АРС делегуються повноваження по прийняттю рішень

«на місці» в залежності від обставин. Згідно термінології, яка склалася в області дослідження та розробки таких систем, окремий вузол АРС отримав назву автономний агент (autonomous agent), що відображає його часткову або повну незалежність у прийнятті рішень від людини-користувача системи та інших вузлів АРС. Відповідно в цілому АРС розглядається як багато-агентна система (multi-agent system) [1-7] або колектив автономних агентів [8-12]. Цими термінами відображається децентралізованість АРС, тобто відсутність в системах такого класу єдиного центру управління. Для організації роботи АРС, як правило, використовують методи прийняття рішень в умовах невизначеності [13,14] та методи машинного навчання, зокрема методи навчання з підкріпленням [1, 15, 16].

Існуючі на даний час підходи до дослідження та розробки АРС можна умовно поділити на два великих класи: 1) об'єднання в колектив множини "простих" автономних агентів з метою отримання синергетичного ефекту від їх спільних зусиль [8-10]; 2) координація поведінки множини «складних» (інтелектуальних) автономних агентів, об'єднаних у багато-агентну систему [1,2]. Спільним недоліком цих підходів є спрямування зусиль в окремих специфічних напрямках досліджень (наприклад, лише на проблемі побудови ігрових методів координації автономних агентів [2]) за відсутності вкрай необхідних узагальнень в рамках більш широкого системного підходу.

Одним з найбільш перспективних напрямків подолання цього недоліку ґрунтується на ідеї самоорганізації автономної розподіленої системи (колективу автономних агентів), як процесу взаємодоповнення та впорядковуючого об'єднання вузлів АРС (автономних агентів) у єдиний колектив, функціональні можливості якого вищі за просту суму можливостей окремих автономних агентів, та який здатний адаптуватись до змін і впливів зовнішнього середовища шляхом зміни своєї структури, функцій та параметрів [17-21].

В найбільш загальному випадку АРС розглядається як однорангова множина n вузлів (автономних агентів) $A = \{a\}_n$, повністю або частково незалежних з точки зору процесу прийняття рішень. Кожний вузол АРС (автономний агент)

безпосередньо взаємодіє з середовищем E (об'єктом управління), в якому розміщена АРС. На кожному кроці цієї взаємодії автономний агент a згідно узагальненої функціональної схеми автономного агента (рис.1.1): 1) сприймає біжучий стан середовища s за допомогою сенсорної системи $P(E,a)$, 2) виконує оцінку біжучого стану середовища на основі заданої функції оцінки $R(s,a)$, 3) обмінюється деякою службовою інформацією з іншими агентами у спосіб $C(a)$, який визначається моделлю інформаційної взаємодії автономних агентів; 4) приймає рішення про вибір своїх подальших дій згідно деякого алгоритму прийняття рішень $U(a)$, намагаючись максимізувати задану цільову функцію $f(a)$; 5) реалізує обрані дії в середовищі за допомогою наявних виконавчих підсистем $D(a)$.

Множина автономних агентів A , об'єднаних деякою спільною метою, утворює колектив автономних агентів (багато-агентну систему, multi-agent system). Колективна дія – це сукупність індивідуальних дій окремих автономних агентів (рис.1.2). Послідовність колективних дій в ході між-агентної взаємодії та взаємодії з середовищем E формує колективну поведінку АРС. Таким чином колективна поведінка відображає хід частково або повністю незалежних процесів прийняття рішень окремими автономними агентами, які об'єднані у складі АРС. Цільова функція всього колективу $F(A)$ – це агрегатна функція (aggregate function), яка об'єднує цільові функції окремих агентів $\{f(a)\}$ і визначає характер та спрямування колективної поведінки. Відтак, у разі заданої цільової функції колективу постає проблема її відображення у множину цільових функцій окремих агентів:

$$F(A) \rightarrow \{f(a)\}. \quad (1.1)$$

В загальному випадку припускається, що цільові функції автономних агентів $\{f(a)\}$ можуть бути різними. В більш специфічному (з точки зору особливостей синтезу) випадку додатково вимагається, щоб усі цільові функції $\{f(a)\}$ були однаковими [3,4].

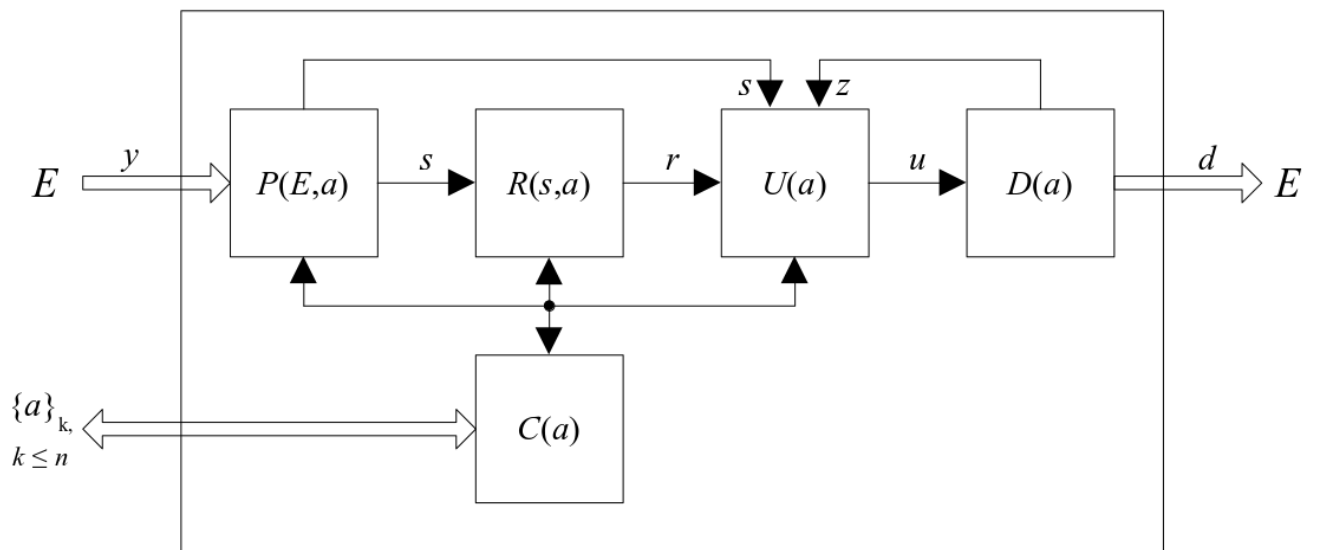


Рис. 1.1. Узагальнена функціональна схема автономного агента (вузла APC)

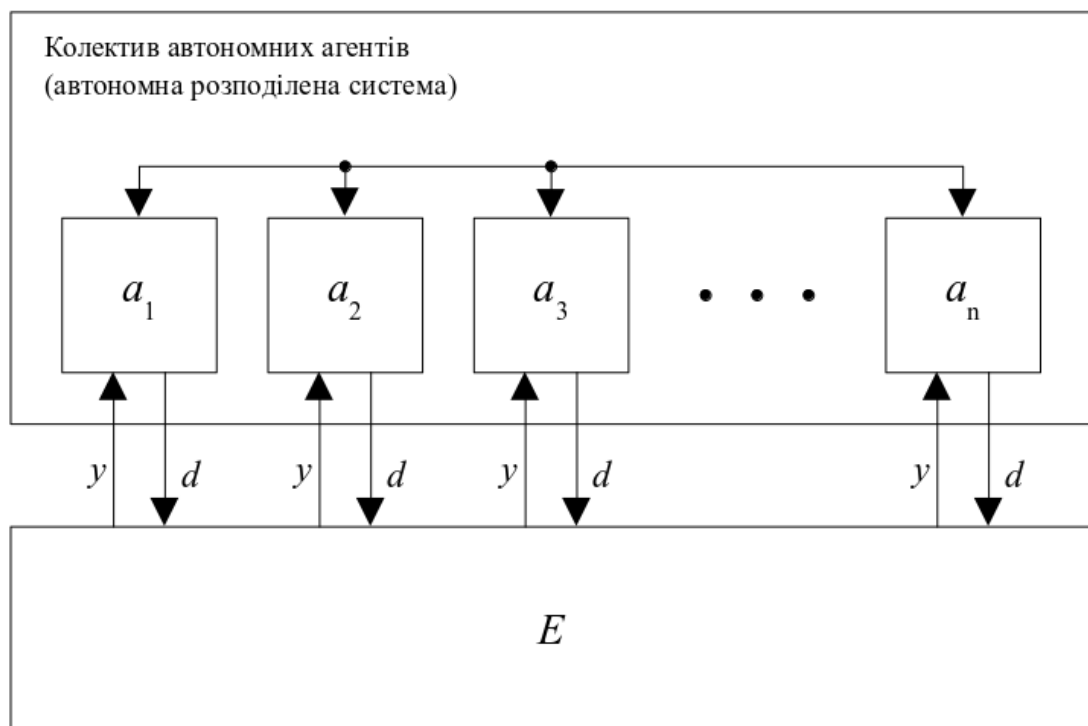


Рис.1.2. Схема взаємодії колективу автономних агентів з середовищем

В такий спосіб досягається максимальна живучість APC внаслідок повної взаємозамінності окремих вузлів APC (автономних агентів) та спрощується практична реалізація APC за рахунок повної уніфікації її вузлів.

Після знаходження цільових функцій $\{f(a)\}$ постає проблема їх відображення у характеристики сенсорної системи, функції оцінки, спосіб інформаційної взаємодії агентів, алгоритми прийняття рішень та можливості щодо їх реалізації:

$$\{f(a)\} \rightarrow \{P(E,a), R(s,a), C(a), U(a), D(a)\}. \quad (1.2)$$

Як правило, цю задачу синтезу доцільно розбити на дві підзадачі: 1) вибір і забезпечення сенсорних, комунікаційних та виконавчих можливостей автономних агентів $\{P(E,a), C(a), D(a)\}$; 2) розробка алгоритмів колективної поведінки $\{R(s,a), U(a)\}$, ґрунтуючись на заданих можливостях автономних агентів. Разом з тим розглядаються також інші питання, пов'язані з витратами енергії, забезпеченням необхідної обчислювальної потужності та ін.

Основні вимоги, які висуваються до алгоритмів колективної поведінки, наступні: 1) робота в реальному масштабі часу: вибір рішення окремим автономним агентом має займати деякий незмінний проміжок часу, який не перевищує заданої величини затримки; 2) локальність поведінки: алгоритм колективної поведінки має бути поданий у вигляді сукупності локальних алгоритмів індивідуальної поведінки автономних агентів; 3) локальність взаємодії: алгоритм колективної поведінки має коректно працювати в умовах обмеженої інформаційної взаємодії агентів (наприклад, в умовах обмеженого радіусу видимості засобів зв'язку вузлів APC); 4) уніфікованість ("однаковість"): всі автономні агенти мають виконувати один і той самий локальний алгоритм (для випадку однакових цільових функцій $\{f(a)\}$); 5) незалежність роботи локальних алгоритмів від поточної кількості автономних агентів: алгоритм колективної поведінки має продовжувати працювати коректно, не дивлячись на зміни чисельності колективу (наприклад, внаслідок виходу деяких автономних агентів з

ладу або приєднання до колективу нових автономних агентів). Останні дві вимоги в багатьох випадках розглядаються як занадто жорсткі і не приймаються до уваги [19].

Таким чином, процес створення АРС складається з трьох основних кроків: 1) визначення цільової функції колективу автономних агентів $F(A)$; 2) визначення цільових функцій окремих автономних агентів $\{f(a)\}$, виходячи з $F(A)$; 3) забезпечення необхідних можливостей автономних агентів $\{P(E,a),C(a),D(a)\}$ та розробка алгоритмів колективної поведінки $\{R(s,a),U(a)\}$, виходячи з $\{f(a)\}$.

1.2. Аналіз моделей та методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах

Розглядаючи вказані проблеми разом, можна прийти до ідеї про прямий зв'язок між способом функціонування системи автономних досліджень і характеристиками тих процесів, що розгортаються в об'єкті досліджень. Іншими словами можна вести розмову про задачу розробки такого інструменту досліджень, який би самостійно (проблема управління) знаходив найкращий згідно заданій системі критеріїв спосіб дослідження цільового об'єкту (проблема розміщення). При цьому в найбільш складному варіанті цієї задачі процеси, які розгортаються в об'єкті дослідження підпорядковуються законам нелінійної динаміки (тобто являються синергетичними процесами). З врахуванням цього, в [18] висунуто гіпотезу: якщо синергетичним процесам, що розгортаються в середовищі, поставити у відповідність можливості самоорганізації системи автономних довготермінових досліджень, то така опосередкована подібність об'єкту та інструменту дозволить підняти автономні дослідження на новий якісний рівень (з точки зору кількості та якості отримуваної інформації).

З точки зору можливостей підтвердити або спростувати цю гіпотезу, а також з врахуванням функціональної автономності окремої дослідницької станції (вимірювального агента) для вирішення поставленої задачі найбільш доцільно на наш погляд використовувати методи теорії колективної поведінки

(багатоагентних систем) [1-10]. Цей вибір в першу чергу зумовлений тим, що в рамках теорії колективної поведінки досліджується питання передачі «ініціативи» в прийнятті рішень автономним технічним системам. Крім цього, в даному випадку можна провести пряму аналогію між процесом структурної адаптації (самоорганізації) системи автономних досліджень та виникненням складних форм колективної поведінки на основі сумісної реалізації відносно простих поведінкових актів окремими вимірювальними агентами, тобто, іншими словами, розглядати процес функціональної емерджентності, де елементами системи (колективу) виступають вимірювальні агенти.

Таким чином, загальна задача полягає у розробці таких алгоритмів колективної поведінки вимірювальних агентів, які б дозволяли з'ясувати «порядок» притаманний досліджуванім процесам, і, виходячи з цього, організовували б таку колективну поведінку (спосіб функціонування системи та її структуру), яка б найкращим чином відповідала цьому "порядку". Тобто в даному випадку передбачається, що колектив вимірювальних агентів буде здатний асимілювати «порядок» середовища в такий спосіб, щоб колективна поведінка, яка при цьому виникала, відповідала найкращому способу дослідження цього середовища. При цьому до розроблюваних алгоритмів висуваються три основні вимоги: децентралізація (вимірювальні агенти самостійно приймають рішення в умовах відсутності єдиного центру управління), однорідність (всі вимірювальні агенти однакові з точки зору алгоритмів індивідуальної поведінки) і локальність інформаційної взаємодії (вимірювальні агенти приймають рішення в умовах обмежень на об'єм та швидкість обміну інформацією між собою). Треба підкреслити, що виконання цих вимог гарантує високу надійність роботи системи автономних досліджень (в першу чергу з точки зору її живучості). В даному випадку система буде продовжувати виконувати свої функції доти, доки в її складі буде лишатися хоча б один працюючий вимірювальний агент. При цьому зміна кількості вимірювальних агентів, як в бік зменшення, так і в бік збільшення, не потребує ніяких спеціальних «зовнішніх» процедур, корегуючих роботу

системи. В той же час питання про залежність якості роботи системи від кількості вимірювальних агентів потребує дослідження.

1.3. Аналіз принципів самоорганізації вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах

Базовий сценарій використання АРС передбачає початкове розміщення системи у цільовому середовищі у вигляді множини автономних вузлів АРС, поєднаних каналами зв'язку у відповідності до обраної та реалізованої у системі моделі інформаційної взаємодії вузлів, 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 та ін.) та внутрішньої природи (тимчасова або постійна відмова окремих вузлів АРС, втрата зв'язку між деякими вузлами АРС, введення в роботу нових додаткових вузлів та ін.). Відповідно метою застосування принципів самоорганізації та адаптації в 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 в 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 про-активних комп'ютерних систем (pro-active computer systems) [6] та спорідненій з нею концепції автономних обчислень (Autonomic computing) [7-9], які запропоновані та розвиваються дослідницькими підрозділами фірми ІВМ, передбачено делегування автономним програмним агентам суттєвої частини повноважень у прийнятті рішень по поточній оптимізації розподілених обчислювальних систем

та забезпеченню 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 в рамках єдиної системи дозволяє отримувати якісно нові результати, які можна широко використовувати для побудови автономних розподілених систем. Спираючись на концепцію кіберфізичних систем, провідні наукові установи та групи по всьому світу спрямовують свої зусилля на пошук нових напрямків розвитку інформаційно-обчислювальних технологій шляхом об'єднання та інтегрування різних за призначенням підсистем у єдину децентралізовану та гнучку систему. У 2012 році кіберфізичні системи, як напрям досліджень, був визначений Національним науковим фондом (National Science Foundation) США як ключовий напрям 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], запропоновану науковцями Університету Каліфорнії (Берклі) та обрану в якості одного з перспективних напрямків розробок Агентством 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 присутність фізичних об'єктів у глобальній мережі в якості вузлів, від яких можна отримувати інформацію та віддавати їм команди. Аналіз зазначених концепцій та науково-технічних напрямків підтверджує велику перспективу ідей та принципів,

закладених в основу побудови та функціонування автономних розподілених систем. При цьому складні завдання, які ставляться перед АРС в рамках цих концепцій, потребують дослідження та застосування методів адаптації та самоорганізації як одного з невід'ємних напрямків розвитку інформаційних технологій та обчислювальної техніки.

Розглянемо проблему побудови та напрямки вдосконалення автономних розподілених систем з елементами самоорганізації, виходячи з сучасних концепцій розвитку інформаційних технологій та обчислювальної техніки. Виходячи з аналізу сучасних концепцій розвитку інформаційних технологій і обчислювальної техніки та останніх досягнень в області обчислювальних та комунікаційних засобів, можна відзначити наступні загальні тенденції:

1) Зростання складності інформаційно-обчислювальних систем (в тому числі за рахунок різкого збільшення кількості мобільних обчислювальних пристроїв, що входять до їх складу) призводить до збільшення недетермінованої складової в їх роботі. У випадку АРС відповідна складність їх внутрішньої організації («внутрішнє середовище») стає джерелом невизначеності при вирішенні 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 суттєвою долею недетермінованості у часі і просторі. У випадку АРС це відображається у складність моделі зовнішнього цільового середовища, в якому розміщується АРС 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 наступних дій користувачів в процесі інтерактивної взаємодії з інформаційно-обчислювальними системами. У випадку АРС 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.

Таким чином в більшості варіантів застосування АРС передбачається наявність невизначеності (нестачі інформації) в процесах прийняття рішень в рамках повноважень, які делеговані АРС людиною. При формулюванні та пошуку рішень відповідних задач конструктивно та функціонально автономний вузол АРС 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 наступне 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 (багато-агентної системи), функціональні можливості якої вище за суму можливостей окремих сутностей (агентів), що входять до її складу;
- системи, яка здатна адаптуватись до впливів зовнішнього середовища шляхом зміни своїх функцій та структури;
- системи, яка здатна підтримувати свій гомеостазис та життєдіяльність при недетермінованих змінах зовнішнього середовища;
- системи, яка здатна виявляти неоднорідності речовини та енергії у просторі та часі;

завдяки чому досягається вищий, якісно новий рівень можливостей щодо виконання системою поставлених перед нею власником, або сформованих нею самою завдань в сфері практичної діяльності. При цьому слід зауважити, що самоорганізація як процес і як результат не може розглядатись як властивість будь-якої повністю централізованої системи. Можна висунути гіпотезу, що самоорганізація досягається при відсутності будь-яких механізмів

централізованого управління, в той час, як централізовані системи породжують лише централізовану організацію як процес, і як результат.

Наведене вище визначення самоорганізації використовувалось нами в держбюджетних науково-дослідних роботах «Розробка нових принципів побудови ВОМ з елементами самоорганізації для екологічного моніторингу» (2000-2001 рр.), «Інтелектуальні реконфігуровані нарощувані ВОМ екологічного моніторингу: принципи структурної самоорганізації та функціонування» (2002-2003 рр.), «Конфігуровані вимірювальні-обчислювальні мережі інтелектуальних автономних агентів для вирішення задач моніторингу навколишнього середовища» (2004-2006 рр.) [2-5].

З точки зору принципів структурної адаптації [17] можна також дати наступне 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 ставляться перед системою користувачем.

Окремо слід зауважити, що складність проблеми побудови та організації роботи АРС з елементами самоорганізації, напряду обумовлюється складністю цільового середовища, з яким взаємодіє АРС в процесі виконання поставлених перед нею завдань. Відтак складність моделі середовища визначає складність процесів прийняття рішень, які мають бути реалізовані у АРС. Тому питання класифікації та побудови моделей середовища в області розробки АРС з елементами самоорганізації є особливо актуальним. При цьому можна виділити два основних напрямки класифікації: 1) по природі середовища; 2) по характеристиках середовища.

В рамках 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 мережне 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 з більш загальних позицій типізації можна розрізнити фізичне, біологічне та суспільне середовище.

В рамках другого напрямку класифікації розглядаються різні набори характеристик середовища, які безпосередньо впливають на складність відповідних процесів прийняття рішень. Прикладом такого набору є наступна множина класифікаційних ознак цільового середовища [18]: доступне / недоступне (для спостереження), детерміноване / недетерміноване, епізодичне / не епізодичне, статичне / динамічне, дискретне / неперервне. В даному випадку кожна класифікаційна ознака визначає окремий аспект «простоти» та «складності» середовища. Іншим розповсюдженим варіантом є класифікація середовищ згідно параметрів математичної моделі, яка використовується для розробки алгоритмів роботи АРС. Сюди, наприклад, відносяться наступні моделі ймовірнісних характеристик середовища (в порядку зростання складності): стаціонарне випадкове середовище [8,9], випадкове середовище з перемиканням станів [8,9], марківський процес прийняття рішень [14-16], марківський процес прийняття рішень з частковою доступністю для спостережень [15] та ін.

До основних проблем побудови та організації роботи АРС можна віднести наступні проблеми.

1) Проблема забезпечення синергії (властивості функціональної емерджентності) при поєднання автономних агентів в єдину АРС. 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 АРС (згідно принципу налаштування інструменту дослідження під об'єкт дослідження [18]). З більш загальної точки зору можна розглядати адаптацію процесу саморозвитку АРС до синергетичних процесів, що розгортаються в цільовому середовищі.

3) Проблема оперативності управління [17], яка полягає у неможливості повністю централізованого управління АРС та вимагає пошуку відповідних децентралізованих схем та способів управління. В більш широкому аспекті ця проблема вкладається в актуальну тенденцію дослідження та використання ресурсу децентралізованого управління.

4) Проблема пошуку оптимального співвідношення між швидкістю прийняття рішень в АРС та їх якістю (точністю) з точки зору обраного критерію якості роботи АРС. При цьому якість (точність) рішень, як правило, визначається складністю моделі середовища, яка реалізована та використовується в АРС. Для вирішення цієї проблеми доцільно використовувати принципи адаптивного управління (в тому числі дуального управління) та концепцію адаптивних моделей.

5) Проблема розробки та реалізації ієрархії складності алгоритмів поведінки автономних агентів у складі АРС (у відповідності 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.

6) Проблема автономного пошуку такого рівня складності внутрішньої організації АРС, який найкраще відповідає складності цільового середовища, з яким взаємодіє АРС (проблема адаптації рівня складності АРС до складності середовища або задачі, що вирішується). При цьому передбачається можливість спрощення та ускладнення механізмів функціонування АРС під час її роботи. Також, виходячи з того, що більша складність потребує більших обчислювальних та комунікаційних ресурсів, можна розглядати процес спрощення/ускладнення

механізмів функціонування АРС як рішення 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 та ін.), методів машинного навчання (machine learning) та методів формування і перевірки гіпотез про найкращу за низкою критеріїв модель середовища (теорія планування експериментів).

До основних напрямків розвитку АРС з елементами самоорганізації та вирішення відповідних дослідницьких задач можна віднести наступні напрямки.

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 рамках даного напрямку заслуговують методи та алгоритми навчання з підкріпленням в багато-агентних системах [1], в тому числі 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 багато-агентних систем (multi-agent systems), зокрема способів самоорганізації механізмів ігрової координації спільних колективних дій автономних агентів (як вузлів АРС). Відповідно особливої уваги серед технологій багато-агентних систем заслуговують методи пошуку найбільш ефективних механізмів ігрової координації спільних колективних дій автономних агентів, розробка нових архітектур інтелектуальних автономних агентів та відповідних способів їх взаємодії і координації спільних узгоджених дій [2].

3) Використання методів наукового напрямку «Інтелект рою» (swarm intelligence) [3], в рамках якого відбувається пошук та дослідження природних аналогів самоорганізації у біологічних системах (наприклад, мурашині

алгоритми) з їх подальшим використанням в АРС. На особливу увагу в рамках цього напрямку заслуговують способи координації спільної поведінки простих агентів на основі тимчасових міток, які вони лишають у точках координаційного простору [3].

4) Дослідження та використання методів параметричної адаптації, зокрема широкого класу оптимізаційних задач, рішення яких автоматизується і виконується під час роботи АРС. При цьому важливо забезпечити можливість інкрементної оптимізації роботи АРС по мірі збільшення інформації про цільове середовище, яка здобувається одночасно з процесом оптимізації.

5) Дослідження та використання методів структурної адаптації, 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 своїми можливостями методи параметричної адаптації, але і потребують більш складних алгоритмів для своєї реалізації.

1.4. Постановка задачі організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах

Задача автономних розподілених досліджень [22-24] стає все більш актуальною із зростанням можливостей по створенню відповідних систем автономних довготермінових досліджень в інтересах різних наук (океанологія, метеорологія), вирішення екологічних проблем (екологічний моніторинг, виявлення та контроль забруднень оточуючого середовища), а також промислових та військових застосувань. Загальний сценарій розподілених контактних досліджень передбачає розміщення безпосередньо в просторі об'єкту дослідження деякої обмеженої кількості функціонально автономних вимірювачів, кожний з яких здатний збирати вимірювальну інформацію і передавати її в центр

збору та обробки (глобальний користувач). В іншому варіанті сценарію споживач вимірювальної інформації (локальний користувач) також знаходиться в просторі об'єкта дослідження і використовує цю інформацію, наприклад, для синтезу прямих управляючих впливів на об'єкт. При цьому в залежності від можливостей вимірювачів і задач, що ставляться перед ними, можна розрізняти системи різного рівня складності, починаючи від безпроводних сенсорних мереж і закінчуючи глобальними системами збору гідрометеорологічних даних.

На окрему увагу заслуговують системи автономних довготермінових досліджень, в яких вимірювачі здатні переміщуватись в просторі об'єкту дослідження, змінюючи в такий спосіб «просторову» структуру системи. Здатність до переміщення відкриває широкі можливості по більш глибокому вивченню об'єкта, оскільки з'являється можливість керувати розміщенням і (або) переміщенням вимірювачів в просторі досліджуваного об'єкту. В якості прикладу таких систем можна навести мобільні безпроводні сенсорні мережі або автономні системи океанологічних досліджень. В даному випадку в якості носія, який забезпечує можливість переміщувати вимірювач у просторі, можуть, наприклад, виступати мобільний робот, безпілотний літальний апарат або автономний підводний апарат. Таким чином, можна говорити про мобільну автономну дослідницьку станцію, в склад якої крім всього іншого входять сенсорна система, система зв'язку та навігації, система переміщення, система енергозбереження та блок прийняття рішень. В подальшому будемо називати таку станцію мобільним вимірювальним агентом, а систему одночасно функціонуючих станцій – колективом мобільних вимірювальних агентів.

З функціонуванням систем автономних довготермінових досліджень на основі мобільних вимірювальних агентів пов'язана низка проблем [22]. Серед них можна виділити дві – найбільш суттєві на наш погляд – проблеми. Перша проблема – проблема розміщення – викликана обмеженням на кількість вимірювальних агентів, що розміщуються в просторі об'єкта дослідження. Це обмеження є природнім відображенням принципу мінімізації впливу вимірювального інструменту на об'єкт дослідження [25] і призводить до того, що

в один момент часу можна отримати обмежену кількість інформації про цей об'єкт. При цьому можна зробити припущення, що різним розміщенням вимірювальних агентів в просторі об'єкта досліджень відповідають різні з точки зору кількості інформації відображення цього об'єкту. Внаслідок цього виникає проблема розміщення: яким чином розмістити задану кількість вимірювальних агентів в просторі, щоб отримати найбільш інформативне в рамках природних обмежень відображення досліджуваного об'єкту?

Друга проблема – проблема управління – викликана «віддаленістю» користувача (глобального або локального) від системи автономних довготермінових досліджень, що в більшості випадків, не дає можливості користувачу ефективно (точно і своєчасно) вирішувати проблему розміщення. Специфікою роботи систем автономних довготермінових досліджень є повна або часткова відсутність у користувача апріорних відомостей про характер досліджуваних процесів, що розгортаються в об'єкті. Тому ефективність тих рішень проблеми розміщення, які може запропонувати користувач, завжди буде обмежена деяким фіксованим значенням, яке відповідає рівню нестачі інформації про біжучі умови вирішення цієї проблеми. При цьому повністю подолати цю нестачу інформації (невизначеність) користувач в наслідок своєї «віддаленості» не може. Отже, виникає проблема управління: яким чином і наскільки передати «ініціативу» по вирішенню проблеми розміщення самій системі автономних довготермінових досліджень?

Перші кроки у вирішенні зазначених проблем були зроблені в галузі проектування та розробки інформаційно-вимірювальних систем здатних працювати в автономному режимі [26-29] та теорії планування експериментів [30-33]. На даний час розвинулась ціла низка різних підходів до вирішення цих проблем та відповідних напрямків досліджень [34-49], зокрема в області дослідження методів організації адаптивних ВО-процесів.

Висновки до розділу 1

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. Розглянуто особливості побудови та функціонування автономних розподілених систем та запропоновано узагальнений опис автономної розподіленої системи на основі принципів децентралізації та самоорганізації. Запропоновано узагальнену постановку задачі організації адаптивних ВО-процесів в автономних розподілених системах. 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.

3. Виконано аналіз основних принципів самоорганізації ВО-процесів в автономних розподілених системах. Визначені основні тенденції розвитку та напрямки вдосконалення автономних розподілених систем з елементами самоорганізації, виходячи з сучасних концепцій розвитку інформаційних технологій та обчислювальної техніки.

2. СТРУКТУРНА АДАПТАЦІЯ ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОНОМНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ

2.1. Організація адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в задачах автономних розподілених досліджень

2.1.1. Автономна розподілена вимірювально-обчислювальна система

На даний час проблема дослідження та розробки автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем набуває все більшої актуальності. Виходячи з сучасного стану розвитку обчислювальних технологій та технологій бездротових мереж (wireless networks), можна зробити висновок про різке збільшення можливостей щодо практичної реалізації автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем. Разом з тим останнім часом різко зростає потреба у системах даного класу у зв'язку із загальним зростанням областей та масштабів застосування інформаційних технологій і технологій штучного інтелекту. Тому в роботі розглядається актуальна проблема структурної адаптації автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем, вирішення якої дозволить підняти їх функціональність на новий якісний рівень.

Автономна розподілена вимірювально-обчислювальна система призначена для збору та попередньої обробки вимірювальної інформації в автономному режимі (без участі людини-оператора) в умовах просторової розподіленості об'єкту дослідження. Зібрана нею інформація передається у віддалений центр збору та обробки інформації чи використовуються «на місці» відповідними виконавчими системами (наприклад, автономними мобільними системами розподіленої робототехніки [6]). Внаслідок відсутності людини-оператора та віддаленості центру збору та обробки при побудові таких систем виникає проблема оперативності управління [17,18]. Для вирішення цієї проблеми автономній розподіленій вимірювально-обчислювальній системі делегується частина повноважень щодо вибору та аналізу своїх дій. У зв'язку з цим при дослідженні та розробці таких систем інтенсивно застосовуються концепції та

технології штучного інтелекту, зокрема концепція інтелектуального автономного агента (intelligent autonomous agent) та багато-агентних систем (multi-agent systems). В рамках цього підходу окремий вузол автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи отримав назву вимірювальний агент, яскравим прикладом якого може служити автономна мобільна дослідницька станція. Відповідно множина вимірювальних агентів, об'єднаних у єдину цілісну систему, в рамках цього підходу називається колективом вимірювальних агентів $K=\{a\}_n$, де n – кількість вимірювальних агентів в колективі [50-54]. Прикладом колективу вимірювальних агентів може служити мобільна безпроводна сенсорна мережа (mobile wireless sensor network). Дослідженню різних проблем розробки та оптимізації колективної поведінки вимірювальних агентів присвячено багато зусиль різних наукових груп та шкіл [34-49]. На особливий інтерес серед усіх цих досліджень заслуговують спроби забезпечити можливість самостійного пошуку колективом вимірювальних агентів найкращих (згідно заданих критеріїв) способів дослідження деякого об'єкта O (рис. 2.1). Розглянемо підхід до узагальненого опису цих спроб та пропонується схема вирішення відповідної проблеми за допомогою механізму структурної адаптації автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи [23].

Розглянемо проблему структурної адаптації автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем, в тому числі розробимо узагальнену модель організації ВО-процесів в задачах автономних розподілених досліджень, які виконуються за допомогою автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи, розглянемо відповідну процедуру дослідження як процес прийняття рішень в умовах невизначеності, а також розробимо механізм структурної адаптації ВО-процесів.

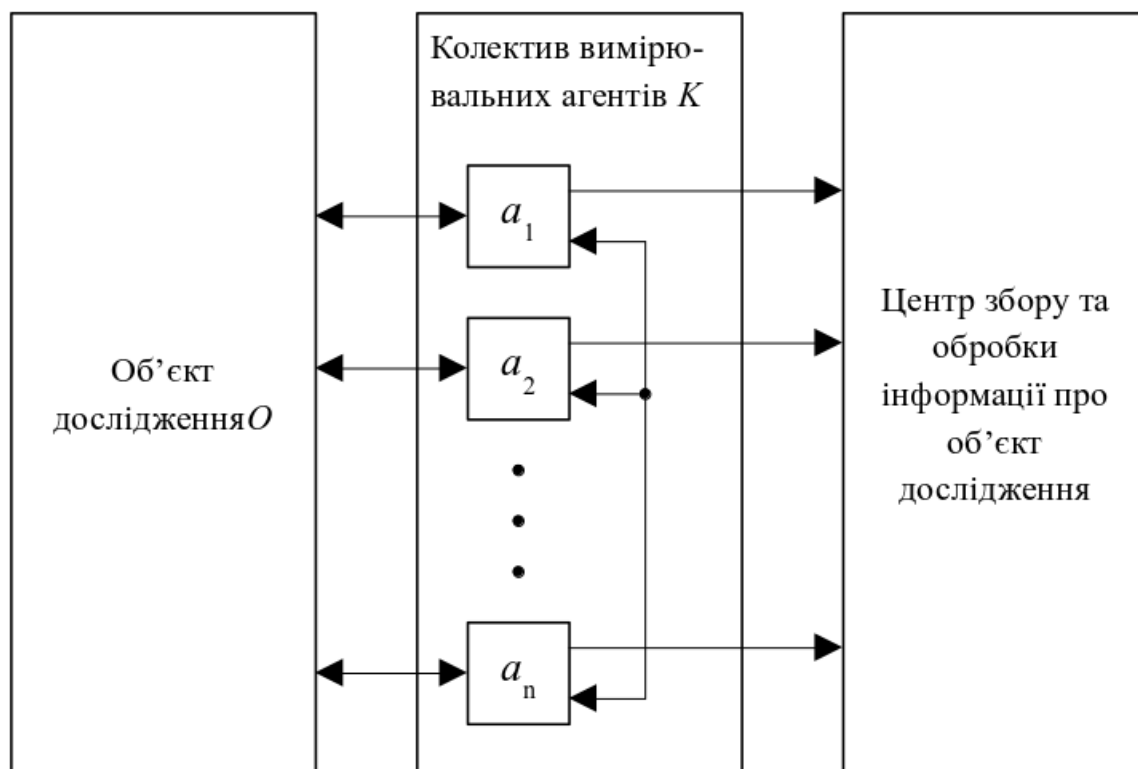


Рис. 2.1. Схема організації роботи колективу вимірювальних агентів (автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи)

2.1.2. Узагальнена модель організації ВО-процесів в задачах автономних розподілених досліджень

Узагальнюючи існуючі підходи до опису моделі досліджуваного явища (об'єкту дослідження) [23], введемо поняття джерела інформації d про об'єкт дослідження O . Під джерелом інформації будемо розуміти деякий відмінний від інших спосіб дослідження об'єкту, тобто спосіб отримання інформації про нього. У випадку, коли об'єкт O можна досліджувати декількома різними способами (наприклад, змінюючи режими роботи інструменту дослідження), відповідні різні джерела інформації утворюють множину $D=\{d\}_m$, де m – загальна кількість доступних джерел інформації. Кожному джерелу інформації d ставиться у відповідність один або декілька показників, які відображають різницю між джерелами інформації в тому, чи іншому розумінні. Наприклад, в [14] запропоновано поняття достовірності джерела інформації про поточний стан системи у вигляді матриці умовних ймовірностей вірної та помилкової ідентифікації поточного стану. Узагальнюючи цей та багато інших підходів [55-57] до оцінки характеристик джерел інформації, будемо характеризувати кожне джерело інформації d кількістю інформації $I(d,t)$ про об'єкт дослідження, яка зберігається в джерелі d в момент часу t , та швидкістю отримання інформації $V(d,t)$ про об'єкт дослідження за допомогою джерела d в момент часу t .

Виходячи з різних підходів до визначення загальної кількості інформації I_Σ , яку можна отримати про об'єкт дослідження, доцільно розрізняти два класи задач: 1) «потоківі» задачі, в яких I_Σ розглядається як нескінченна величина $I_\Sigma = \infty$; та 2) «ємнісні» задачі, в яких I_Σ розглядається як деяка обмежена величина $I_\Sigma = I_{\max}$. Відповідно в задачах другого класу додатково беруться до уваги питома кількість інформації $\rho(d,t) = I(d,t) / I_{\max}$, що міститься в джерелі d , та відповідна питома швидкість отримання інформації $v(d,t)$ з джерела d .

Множина джерел інформації D , як правило, характеризується деякою структурою внутрішніх зв'язків (взаємозалежностей між джерелами інформації) $C(D)$, яка відображає природу об'єкта дослідження та закони процесів, які в ньому розгортаються. Спосіб визначення та представлення $C(D)$ залежить від

конкретної дослідницької задачі, яка ставиться перед автономною розподіленою вимірювально-обчислювальною системою (колективом вимірювальних агентів). Якщо, в першу чергу, орієнтуватись на способи кількісної оцінки зібраної інформації, то в якості $C(D)$ доцільно використовувати поняття взаємної інформації (mutual information). Тоді для кожної пари джерел інформації визначається величина «перекриття» інформації $c(d_i, d_j)$, яка міститься в джерелах d_i та d_j . При цьому треба зауважити, що можливі також інші, іноді досить складні, способи визначення та представлення $C(D)$, в тому числі комбіновані способи, в яких одночасно відображається декілька різних за змістом уявлень про характер внутрішніх зв'язків між джерелами інформації [58].

Виходячи зі специфіки задачі автономних розподілених досліджень, введемо поняття композитного (складеного) джерела інформації, яке відображає той факт, що кожний вимірювальний агент у складі автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи взаємодіє з об'єктом дослідження незалежно від інших агентів (рис. 2.1). Відтак композитне джерело інформації можна представити у наступному вигляді:

$$d = g(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.1)$$

де x_i – конфігураційний параметр, який знаходиться під незалежним управлінням i -го вимірювального агента, а $g(\)$ – спосіб об'єднання значень конфігураційних параметрів в рамках заданої схеми взаємодії колективу вимірювальних агентів з об'єктом дослідження. При цьому декартів добуток множини усіх джерел $\{d\}_m$ та множини усіх допустимих наборів значень конфігураційних параметрів утворить множину суб-джерел:

$$D' = \{d'\}_k = \{d\} \times \{g(x_1, x_2, \dots, x_n)\}. \quad (2.2)$$

В подальшому для зручності, виходячи з еквівалентності понять «джерело» і «суб-джерело», будемо називати суб-джерела інформації просто джерелами інформації, тобто вважати, що $d' \rightarrow d$, $D' \rightarrow D$, $k \rightarrow m$. Таким чином кожний вимірювальний агент a в кожний момент часу t отримує інформацію про об'єкт дослідження з деякого «власного» джерела $d(a)$, рішення про вибір якого, він

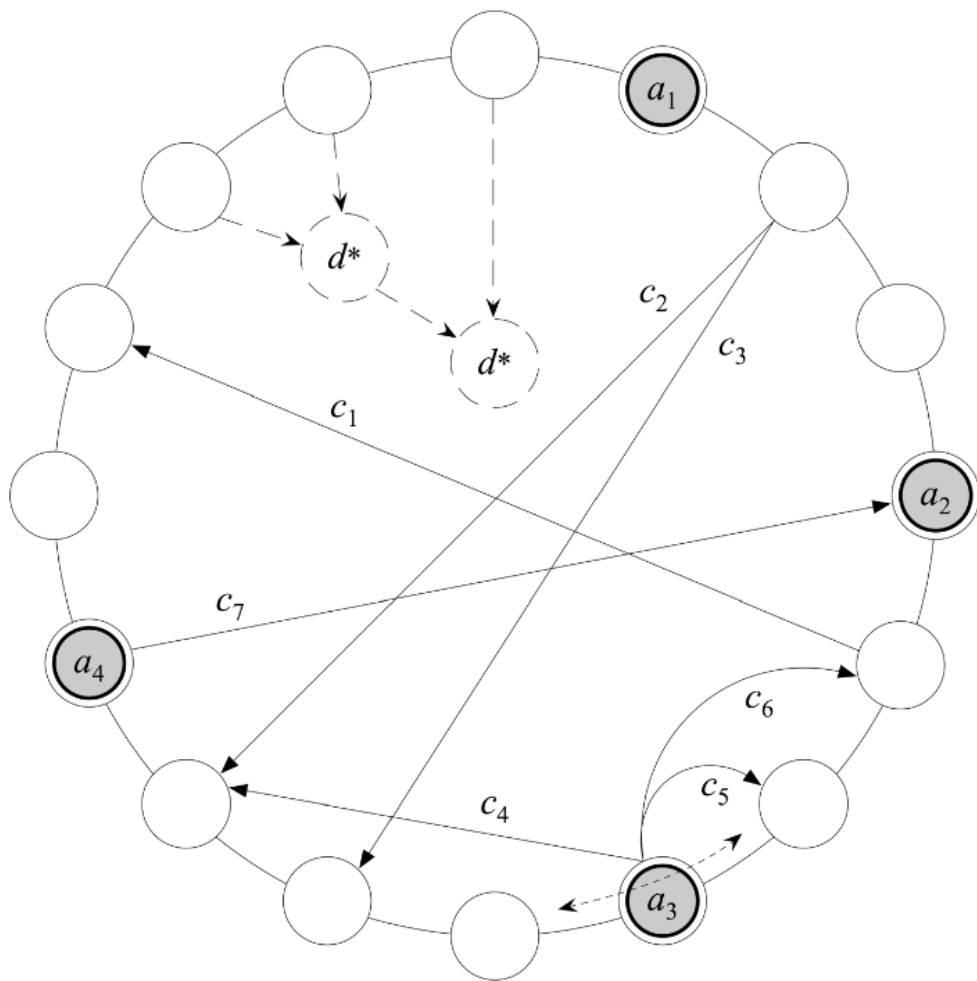


Рис. 2.2. Множина джерел інформації ($m=16$), об'єднаних графом-кільцем схеми припустимих перемикань (d^* – приховане джерело інформації, $\{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7\} \subseteq C(D)$ – зв'язки між джерелами інформації, $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ – вимірювальні агенти, $n=4$)

прийняв на даному часовому кроці (рис. 2.2). Будемо також вважати, що ситуація, коли два чи більше вимірювальних агента отримують інформацію з одного і того самого джерела, неможлива (заборонена внаслідок її очевидної нерациональності). Крім того, будемо вважати, що кількість вимірювальних агентів завжди менша кількості джерел інформації: $n < m$. Відповідно на кожному кроці процедури дослідження формується множина «обраних» вимірювальними агентами джерел інформації $D(a) \subseteq D$ у кількості n (по числу вимірювальних агентів). Окремо слід вказати на можливість використання в постановці задачі поняття «прихованих» джерел інформації (рис. 2.2), які стають доступними вимірювальним агентам лише після отримання всієї інформації (або деякої заданої кількості інформації) з відповідних інших джерел.

Вибір вимірювальним агентом джерела інформації в наступному часовому кроці будемо називати перемиканням джерела інформації. Відповідно поведінка окремого вимірювального агента визначається його локальною функцією перемикань:

$$d_{t+1} = f_a(d_t, t), \quad (2.3)$$

яка визначає послідовність перемикань джерел інформації даним агентом. Сукупність дій вимірювальних агентів по перемиканню джерел інформації формує колективну поведінку, результатом якої є послідовність різних (за складом) конфігурацій множини D_a .

Можливість переходу від одного джерела інформації до іншого за один часовий крок задається схемою припустимих перемикань джерел інформації (рис.2.2) у вигляді матриці $G_{m \times m}$ (та відповідного графу переходів). Крім того для кожного переходу між джерелами задаються витрати вимірювального агента на цей перехід (в цей спосіб, наприклад, моделюються витрати енергії автономної дослідницької станції на пересування у просторі). Для цього використовується функція витрат $f_q(d_i, d_j)$, $i \neq j$.

Таким чином можна сформулювати наступні два варіанта задачі автономних розподілених досліджень: 1) зібрати максимальну кількість інформації на протязі виділеного на дослідження проміжку часу (кількість часових кроків) T ,

мінімізувавши сукупні витрати на перемикання між джерелами ($I_T \rightarrow \max$, $T = \text{const}$, $\Sigma f_q \rightarrow \min$); 2) зібрати всю інформацію про об'єкт дослідження в повному обсязі за якомога меншу кількість часових кроків, мінімізувавши сукупні витрати на перемикання між джерелами ($I_T = I_{\max}$, $T \rightarrow \min$, $\Sigma f_q \rightarrow \min$).

Слід зауважити, що при використанні в якості способу визначення та представлення $C(D)$ поняття взаємної інформації, узагальнений принцип вирішення сформульованих вище задач полягає у наступному. Знайти підмножину $D_a^* \subseteq D$ таких n джерел інформації, інформація з яких найменше перекривається між собою, і, в той же час, максимально перекривається з інформацією усіх інших (не обраних вимірювальними агентами) джерел [33].

2.2. Розв'язок задачі організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів

2.2.1. Моделі організації адаптивних ВО-процесів

Згідно узагальненого опису задачі автономних розподілених досліджень [23, 24] будемо розглядати множину адаптивних ВО-процесів $\{p(a_i)\}$, $i = 0, \dots, n$, де n – кількість ВО-процесів, які виконуються в АРС, та множину джерел інформації $D = \{d\}_m$, де m – загальна кількість доступних джерел інформації, така що $m > n$. Кожний $p(a_i)$ 1) отримує вимірювальну інформацію від сенсорної підсистеми вузла АРС, на якому він виконується; 2) виконує попередню обробку отриманої інформації та доповнює службову модель об'єкту дослідження $M(O)$; 3) приймає рішення про зміну своєї частки обчислювального ресурсу $r(a_i)$ та комунікаційного ресурсу $s(a_i)$, які він використовує; 4) приймає рішення про зміну (перемикання) джерела інформації d , з якого він отримує інформацію; 5) передає отриману вимірювальну інформацію та службову інформацію іншим ВО-процесам та компонентам АРС (рис. 2.3). В один момент часу ВО-процес може отримувати інформацію лише з одного джерела інформації. Перемикання між джерелами здійснюється згідно відомої схеми припустимих перемикань

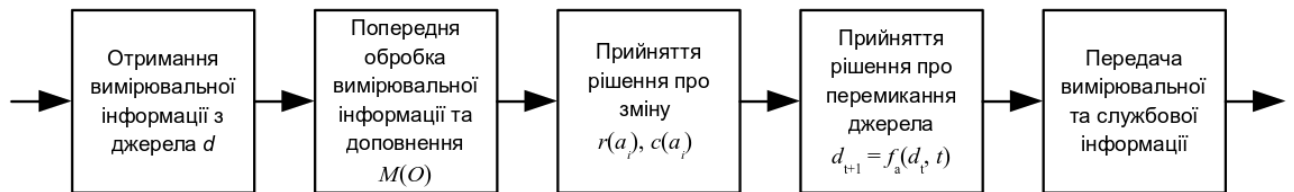


Рис. 2.3. Схема адаптивного вимірювально-обчислювального процесу

джерел інформації та призводить до витрат, які визначаються відомою функцією $f_q(d_i, d_j)$ [24].

Мета організації адаптивних ВО-процесів полягає у зборі максимальної кількості інформації на протязі виділеного на дослідження проміжку часу (кількість часових кроків) T за умови не перевищення сукупних витрат на перемикання між джерелами деякої заданої величини ($I_T \rightarrow \max$, $T = \text{const}$, $\Sigma f_q < Z$). При цьому на кожному кроці сумарна кількість обчислювального та комунікаційного ресурсів обмежена величинами r_s та c_s відповідно (в найбільш загальному випадку ці величини можуть змінюватись від одного кроку до іншого). Складність організації адаптивних ВО-процесів визначається складністю невідомої наперед структури внутрішніх зв'язків (взаємозалежностей між джерелами інформації) $C(D)$, яка відображає природу об'єкта дослідження та закони процесів, які в ньому розгортаються.

Адаптивність ВО-процесу $p(a_i)$ реалізується ітераційними процедурами прийняття рішення щодо 1) цілеспрямованого перерозподілу обчислювальних та комунікаційних ресурсів (в ході координаційної взаємодії з іншими ВО-процесами); 2) цілеспрямованого перемикання джерел інформації (в ході спільного колективного пошуку оптимального набору джерел чи оптимального набору індивідуальних законів перемикання джерел). Відмітимо, що адаптивність ВО-процесу з точки зору ітераційного покращення процедури збору вимірювальної інформації розглядається в контексті ідеї самоорганізації колективу вимірювальних агентів [18, 22] та гіпотези про відповідність здатного до самоорганізації інструменту дослідження складному нелінійному об'єкту дослідження, в якому розгортаються синергетичні процеси [18, 22]. Крім того до зазначених ітераційних процедур прийняття рішення висувуються наступні вимоги [19]: 1) робота в реальному масштабі часу: вибір рішення окремим $p(a_i)$ має займати деякий незмінний проміжок часу, який не перевищує заданої величини затримки; 2) локальність поведінки: кожний $p(a_i)$ має приймати рішення самостійно незалежно від інших ВО-процесів; 3) локальність взаємодії: процедури прийняття рішень мають коректно працювати в умовах обмеженої

інформаційної взаємодії ВО-процесів (в рамках заданої схеми інформаційної взаємодії між $\{p(a_i)\}$); 4) уніфікованість: всі $p(a_i)$ мають виконувати однакові процедури прийняття рішень).

Зауважимо, що у доповнення до класифікації задач, що наведена вище («потоківі» та «ємнісні» задачі), можна запропонувати класифікацію моделей організації адаптивних ВО-процесів на основі різних варіантів змістовної інтерпретації величини $u(d,t)$, під якою будемо розуміти приріст інформації про об'єкт дослідження, отриманий $p(a_i)$ з джерела d на кроці t . З точки зору зміни у часі, в більш простому випадку $u(d,t)$ – це незмінна величина ($u(d,t) = u(d)$), тоді як в більш складному випадку $u(d,t)$ змінюється у часі. Крім цього з точки зору історії вибору (перемикання) джерел, в більш простому випадку $u(d,t)$ не залежить від історії вибору джерел ВО-процесом, тоді як в більш складному випадку $u(d,t)$ залежить від попередніх виборів джерел. Відтак можна визначити три типи моделей організації адаптивних ВО-процесів (в порядку зростання складності відповідних задач в рамках цих моделей):

- 1) $u(d,t)$ не змінюється у часі; задачі в рамках цієї моделі зводяться до пошуку джерел інформації з найбільшими значеннями $u(d)$; прикладом таких задач можуть бути задачі на основі інтерполяційної моделі колективної поведінки вимірювальних агентів [50] та задачі, побудовані на основі методів теорії планування експериментів [33];
- 2) $u(d,t)$ змінюється у часі і не залежить від історії вибору джерел; зміст задач в рамках цієї моделі визначається типом і характером функції $u(d,t)$; наприклад, якщо $u(d,t)$ – це одноступенева функція (вся інформація вибирається з джерела за один такт, після чого вибір даного джерела завжди дає нульовий приріст інформації), то відповідна задача може бути сформульована як варіант задачі пакування рюкзака (knapsack problem); у випадку, коли $u(d,t)$ – це стаціонарна випадкова функція, ми отримуємо варіант задачі цілеспрямованої поведінки у стаціонарному випадковому середовищі [37,38];

- 3) $u(d,t)$ змінюється у часі і залежить від історії вибору джерел; в рамках цієї моделі розглядаються задачі, в яких закладена ідея взаємозалежності джерел інформації (визначеної, наприклад, на основі поняття взаємної інформації); при цьому схема взаємозалежностей джерел може мати як детермінований так і ймовірнісний характер; прикладом таких задач можуть бути задачі, для вирішення яких застосовуються методи структурної адаптації [23], та задачі побудовані на основі марківського процесу прийняття рішень (Markov decision process) та марківського процесу прийняття рішень з обмеженим спостереженням станів (partially observable Markov decision process).

Відмітимо, що за аналогією до величини $u(d,t)$ в моделях організації адаптивних ВО-процесів доцільно розглядати величину $v(d,t)$, під якою будемо розуміти приріст інформації про структури внутрішніх зв'язків між джерелами інформації $C(D)$, отриманий $p(a_i)$ з джерела d на кроці t .

Таким чином модель організації адаптивних ВО-процесів в задачах автономних розподілених досліджень має наступний вигляд

$$M_p = \langle D, C(D), A, G, f_q(d_i, d_j), R(d), W \rangle, \quad (2.4)$$

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 :

$$W: I_T \rightarrow \max, Q(T) \rightarrow \max, \Sigma f_q < Z. \quad (2.5)$$

Відтак колектив адаптивних ВО-процесів здійснює пошук такого розподілу вимірювальних та обчислювальних ресурсів, який забезпечує (2.5).

2.2.2. Процедура дослідження як процес прийняття рішень

Процес вирішення задачі автономних розподілених досліджень доцільно представити у вигляді набору незалежних процесів прийняття рішень окремими вимірювальними агентами (як реалізацій локальних функцій перемикання $\{f_a\}$) у складі автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи. Тоді процедуру дослідження об'єкту O колективом вимірювальних агентів K (рис.2.1) можна представити як цілеспрямовану колективну поведінку вимірювальних агентів [24], в рамках якої кожний агент 1) оцінює успішність своїх власних дій по перемиканню джерел інформації на основі деякої заданої функції оцінки $R(a)$; 2) обмінюється координаційною та іншою службовою інформацією з іншими вимірювальними агентами згідно обраного способу інформаційної взаємодії $J(a)$; 3) приймає рішення про вибір наступного джерела інформації згідно заданого алгоритму прийняття рішень $U(a)$, виходячи з успішності своїх дій та інформації, що надійшла від інших агентів. При цьому для оцінки успішності колективних дій вимірювальних агентів доцільно використовувати розподілену службову модель об'єкту дослідження $M(O)$, яка зберігається в пристроях пам'яті вимірювальних агентів та поступово уточнюється в ході виконання процедури

досліджень. Використання такої моделі дозволяє збільшити ефективність оцінки успішності колективних дослідницьких дій за рахунок об'єднання вимірювальної інформації отриманої різними агентами. Способи організації роботи таких службових моделей та підходи до їх практичної реалізації потребують додаткових досліджень.

Окремо слід підкреслити, що головним елементом розглянутої задачі автономних розподілених досліджень з точки зору побудови процедури дослідження як процесу прийняття рішень є відомості про взаємозалежність джерел інформації D , тобто структуру їх внутрішніх зв'язків $C(D)$. За наявності повної інформації про $C(D)$, розробник системи розподілених досліджень може заздалегідь визначити найкращу процедуру дослідження об'єкту O [33] у вигляді незмінної програми по вибору відповідної конфігурації множини джерел інформації D_a (або відповідної послідовності їх перемикання) за тих чи інших умов роботи системи згідно особливостей конкретної постановки задачі розподілених досліджень. В цьому випадку процедура дослідження (в частині її залежності від $C(D)$) реалізується як процес прийняття рішень в умовах повної інформованості (відсутності невизначеності). На відміну від цього, в умовах повної або часткової відсутності інформації про $C(D)$ процедура дослідження представляє собою процес прийняття рішень в умовах невизначеності, тобто потребує передачі частини повноважень по прийняттю рішень стосовно вибору дослідницьких дій (перемиканню джерел інформації) вимірювальним агентам у складі автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи. При цьому постає проблема одночасного а) збору інформації про об'єкт O (за допомогою обраних на даний момент джерел інформації) та б) дослідження структури внутрішніх зв'язків між джерелами інформації $C(D)$. Для цього необхідно в певний спосіб розподілити «дослідницькі» ресурси автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи (колективу вимірювальних агентів) на виконання двох відповідних під-задач. Цей розподіл ускладнюється тим, що в переважній більшості випадків дослідницькі дії, які спрямовані на збір інформації про $C(D)$, менш ефективні в плані збору інформації про об'єкт O (ніж

спеціально спрямовані на це, інші за своїм характером дослідницькі дії). Те саме стосується низької ефективності дослідницьких дій, спрямованих, в першу чергу, на збір інформації про об'єкт O , з точки зору ефективності збору інформації про $C(D)$.

2.3. Метод структурної адаптації вимірювально-обчислювальних процесів

2.3.1. Принципи роботи та схема методу структурної адаптації

Виходячи з ідеї самоорганізації колективу вимірювальних агентів та гіпотези про відповідність здатного до самоорганізації інструменту дослідження складному нелінійному об'єкту дослідження, в якому розгортаються синергетичні процеси, розглянемо наступний підхід до вирішення сформульованої вище задачі автономних розподілених досліджень. В рамках цього підходу під структурою S будемо розуміти сукупність стійких впорядкованих координаційних зв'язків $\{\sigma(a,a')\}$ між вимірювальними агентами, обумовлених їх поточним функціонально-рольовим розподілом $P(a,t)$. Під структурною адаптацією [10] будемо розуміти цілеспрямований процес оптимізації колективних дослідницьких дій вимірювальних агентів шляхом відповідних дискретних змін структури S .

Згідно висвітленої проблематики побудови процедури дослідження як процесу прийняття рішень в умовах невизначеності розіб'ємо цей процес на два змістовних рівня. На першому – функціональному рівні вимірювальні агенти 1) приймають рішення про вибір дослідницьких дій по збору інформації про об'єкт дослідження згідно алгоритму колективної поведінки $(R_x(a), U_x(a))$, виходячи з наявних відомостей про $C(D)$ (тобто виконують свою «основну» функцію); та 2) приймають рішення про вибір дослідницьких дій по збору інформації про структуру внутрішніх зв'язків джерел інформації $C(D)$ згідно алгоритму колективної поведінки $(R_y(a), U_y(a))$, виходячи з відомого вигляду моделі $C(D)$ (тобто виконують «допоміжну» функцію). На другому – структурному рівні відбувається пошук оптимального співвідношення зусиль вимірювальних агентів, спрямованих на виконання «основної» та «допоміжної»

функцій, у вигляді поточного функціонально-рольового розподілу $P(a,t)$. Тобто передбачається, що під впливом рішень, які приймаються на структурному рівні (рис.2.4), окремий агент перемикається з виконання «основної» функції на виконання «допоміжної» і навпаки (в залежності від вимог поточної ситуації).

Відтак «ядром» методу структурної адаптації (рис. 2.4) є алгоритм колективної поведінки $(R_s(a), U_s(a))$, згідно якого приймаються рішення про дискретні зміни структури S на структурному рівні процесу прийняття рішень. Таким чином колективом вимірювальних агентів одночасно вирішуються дві задачі: 1) оптимізація колективних дій в ході дослідницької взаємодії з об'єктом дослідження (функціональний рівень); та 2) оптимізація внутрішньої між-агентної взаємодії в ході пошуку оптимального функціонально-рольового розподілу вимірювальних агентів $P(a,t)$ та відповідної структури координаційних зв'язків між ними $\{\sigma(a, a')\}$ (структурний рівень).

В якості алгоритмів функціонального рівня $(R_x(a), U_x(a))$ та $(R_y(a), U_y(a))$ доцільно використати алгоритми колективної поведінки вимірювальних агентів, розроблені в рамках дослідження алгоритмічної, інтерполяційної та ентропійної моделей колективної поведінки вимірювальних агентів [50,59]. При цьому тип потрібної моделі визначається специфікою конкретної задачі автономних досліджень. В якості алгоритмів структурного рівня $(R_s(a), U_s(a))$ доцільно використати механізми ігрової координації. Крім цього слід вказати на існування низки інших цікавих підходів, які можна використати для побудови алгоритмів колективної поведінки структурного рівня, зокрема підхід, заснований на концепції перетворення графів (graph rewriting) [60]. Загалом проблема побудови ефективних алгоритмів колективної поведінки структурного рівня заслуговує на окрему увагу і потребує подальших досліджень.

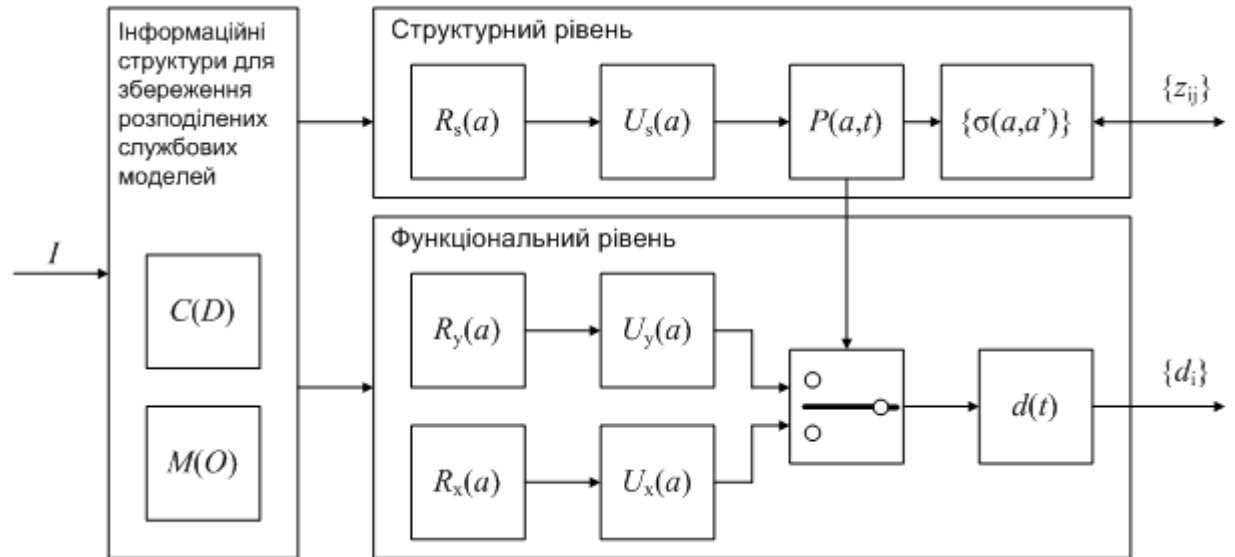


Рис. 2.4. Схема роботи методу структурної адаптації

Основною перевагою запропонованого методу структурної адаптації (як методу організації адаптивних ВО-процесів) у порівнянні з методами-аналогами є можливість накопичувати та використовувати в майбутньому досвід структурних змін (це завдання вирішується на структурному рівні роботи методу). За рахунок цього у випадку значних і відносно швидких змін у оточенні АРС, в об'єкті дослідження або у самій АРС запропонований метод дозволяє віднайти необхідну конфігурацію (структуру) функціонального рівня суттєво швидше за методи-аналоги, які в подібній ситуації починають виконувати реалізовані в них алгоритми оптимізації фактично «з чистого листа», повторюючи довготривалий процес накопичення та використання досвіду на функціональному рівні.

Ще одною перевагою запропонованого методу є можливість визначати на структурному рівні області простору джерел інформації, в яких потрібна більша координація зусиль ВО-процесів, і області, в яких координація зусиль ВО-процесів менш потрібна. За рахунок цього з'являється можливість адаптувати рівень координації ВО-процесів у цих областях відповідним чином, звільняючи тим самим обчислювальні та комунікаційні ресурси.

Обмежене число ВО-процесів N накладає обмеження на вимірювальні ресурси (в один момент часу один ВО-процес можна розмістити лише в одному джерелі інформації з M джерел, при цьому $N < M$) та обчислювальні ресурси (в один момент часу один ВО-процес може здійснити лише деякий об'єм обчислень, обумовлений потужністю відповідного обчислювального пристрою). Розподіл вимірювальних ресурсів полягає у розміщенні ВО-процесів у $N < M$ джерелах інформації. Розподіл обчислювальних ресурсів полягає у виборі обчислювальної процедури (режиму роботи) для прийняття рішення ВО-процесом про переключення між джерелами інформації на даному кроці роботи. Розподіл вимірювальних та обчислювальних ресурсів здійснюється одночасно. Вони пов'язані між собою тим, що вибір джерела інформації впливає на результат роботи обчислювальної процедури, а вибір обчислювальної процедури впливає на порядок вибору наступних джерел інформації. В якості критерію оптимальності

розподілу вимірювальних та обчислювальних ресурсів в даній роботі взято кількість інформації I_T , зібрану колективом ВО-процесів на протязі часу T .

Розглянемо порядок роботи методу структурної адаптації (МСА), як цілеспрямованого процесу оптимізації колективних дослідницьких дій ВО-процесів шляхом відповідних дискретних змін структури

$$S = \langle P(a,t), \{\sigma(a,a')\} \rangle, \quad (2.6)$$

де $P(a,t)$ – біжучий розподіл ВО-процесів по режимах роботи на функціональному рівні, $\{\sigma(a,a')\}$ – множина координаційних зв'язків обумовлених $P(a,t)$.

Позначимо режими роботи ВО-процесу на функціональному рівні (рис. 2.4) як $A_w = (R_x(a), U_x(a))$ – прийняття рішень про вибір дій по збору інформації про об'єкт дослідження; $A_r = (R_y(a), U_y(a))$ – прийняття рішень про вибір дій по збору інформації про структуру внутрішніх зв'язків джерел інформації $C(D)$; та на структурному рівні $A_s = (R_s(a), U_s(a))$ – прийняття рішень про вибір дій по дискретній зміні структури S . Тоді метод структурної адаптації можна представити у вигляді

$$MSA = \langle [A_w = (R_x(a), U_x(a)), A_r = (R_y(a), U_y(a))], A_s = (R_s(a), U_s(a)) \rangle, \quad (2.7)$$

де $R_x(a): r_x(d) = f_u(\{u(d,t)\})$ – 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, $k(t) = 0, \dots, N-1$. $U(a)$ – процедура прийняття рішення про вибір наступної дії. Зокрема

$$U_x(a) = \{F_x(t), f_x(d_t, t), J_x(a)\}, U_y(a) = \{F_y(t), f_y(d_t, t), J_y(a)\}, \quad (2.8)$$

де $F_x(t)$, $F_y(t)$ – цільові функції функціонального рівня, $f_x(d_t, t)$, $f_y(d_t, t)$ – функції перемикування між джерелами (у відповідних режимах роботи A_w і A_r), $J(a)$ – спосіб інформаційної взаємодії та координації роботи з іншими ВО-процесами:

$$J_x(a) = \{\sigma(A_w, A_w), \sigma(A_w, A_r)\}, J_y(a) = \{\sigma(A_r, A_r), \sigma(A_r, A_w)\}. \quad (2.9)$$

Цільові функції функціонального рівня мають наступний вигляд:

$$F_x(t) = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t r_{x,i}(d), F_y(t) = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t r_{y,i}(d), \quad (2.10)$$

де t – номер часового кроку, $r_{x,i}(d)$ – виграш, який визначає успішність роботи ВО-процесу в режимі A_w на кроці t (розраховується на основі величин $u(d,t)$), $r_{y,i}(d)$ – виграш, який визначає успішність роботи ВО-процесу в режимі A_r на кроці t (розраховується на основі величин $v(d,t)$). Цільова функція $F_x(t)$ відображає успішність виконання основного завдання ВО-процесу по збору інформації про об'єкт дослідження (уточнення моделі $M(O)$), тобто чим більше $F_x(t)$, тим більшу кількість інформації I_t зібрав ВО-процес на протязі часу t . Цільова функція $F_y(t)$ відображає допоміжне завдання ВО-процесу по збору інформації про структуру внутрішніх зв'язків джерел інформації $C(D)$.

Процедура прийняття рішення на структурному рівні

$$U_s(a) = \{ F_s(t), f_s(g_t, t), J_s(a), \tau_s \}, \quad (2.11)$$

де $f_s(g_t, t)$ - функція перемикання між режимами роботи (A_w, A_r), $J_s(a) = \{\sigma(A_s, A_s)\}$, τ_s - часовий крок спрацювання $U_s(a)$, $F_s(t)$ - цільова функція структурного рівня:

$$F_s(t) = \frac{\tau_s}{t} \sum_{i=1}^{t/\tau_s} r_{s,i}(g). \quad (2.12)$$

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:

$$Q_{x,t}(d) = Q_{x,t-1}(d) + \alpha_x (r_{x,t}(d) - Q_{x,t-1}(d)), \quad (2.13)$$

$$Q_{y,t}(d) = Q_{y,t-1}(d) + \alpha_y (r_{y,t}(d) - Q_{y,t-1}(d)), \quad (2.14)$$

$$Q_{s,t}(g) = Q_{s,t-1}(g) + \alpha_s (r_{s,t}(g) - Q_{s,t-1}(g)), \quad (2.15)$$

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

У методі структурної адаптації на основі нормованої експоненційної функції (MCA-softmax) (рис. 2.5) наступна дія обирається з ймовірністю:

$$p_{x,t}(d) = \frac{e^{Q_{x,t}(d)/\mu_x}}{\sum_{D_a} e^{Q_{x,t}(b)/\mu_x}}, \quad p_{y,t}(d) = \frac{e^{Q_{y,t}(d)/\mu_y}}{\sum_{D_a} e^{Q_{y,t}(b)/\mu_y}}, \quad (2.16)$$

$$p_{s,t}(g) = \frac{e^{Q_{s,t}(g)/\mu_s}}{\sum_{A_w, A_r} e^{Q_{s,t}(h)/\mu_s}}, \quad (2.17)$$

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 методі структурної адаптації на основі верхньої довірчої межі (MCA-UCB) (рис. 2.6) наступна дія обирається як:

$$d_{t+1} = \arg \max_{D_a} \left(Q_{x,t}(d) + c_x \sqrt{\frac{\ln(t)}{k_{x,t}(d)}} \right), \quad (2.18)$$

$$d_{t+1} = \arg \max_{D_a} \left(Q_{y,t}(d) + c_y \sqrt{\frac{\ln(t)}{k_{y,t}(d)}} \right), \quad (2.19)$$

$$g_{t/\tau_s+1} = \arg \max_{\{A_w, A_r\}} \left(Q_{s,t}(d) + c_s \sqrt{\frac{\ln(t/\tau_s)}{k_{s,t/\tau_s}(d)}} \right), \quad (2.20)$$

де c – масштабуючий коефіцієнт ($c > 0$).

Коли ВО-процес працює в режимі A_w , навчання блоку A_r відбувається в пасивному режимі, і навпаки, коли ВО-процес працює в режимі A_r , навчання блоку A_w відбувається в пасивному режимі. В додатку В. наведено програмну реалізацію запропонованого методу структурної адаптації вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах.

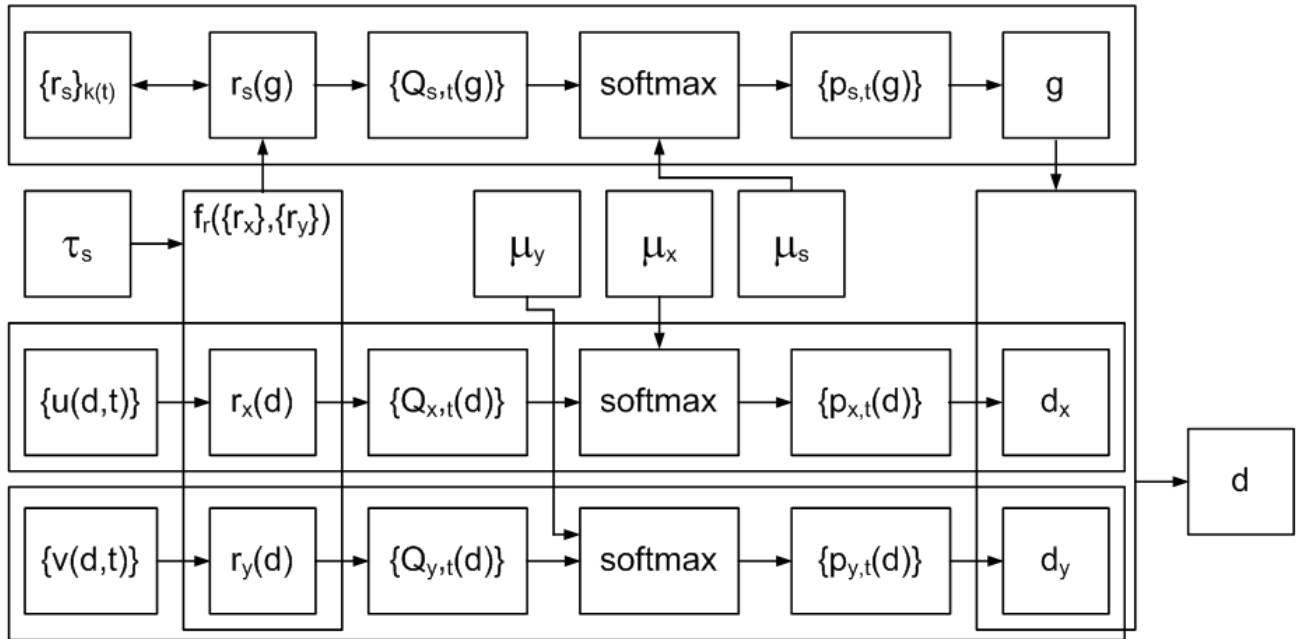


Рис. 2.5. Схема роботи МСА на основі нормованої експоненційної функції (МСА-softmax)

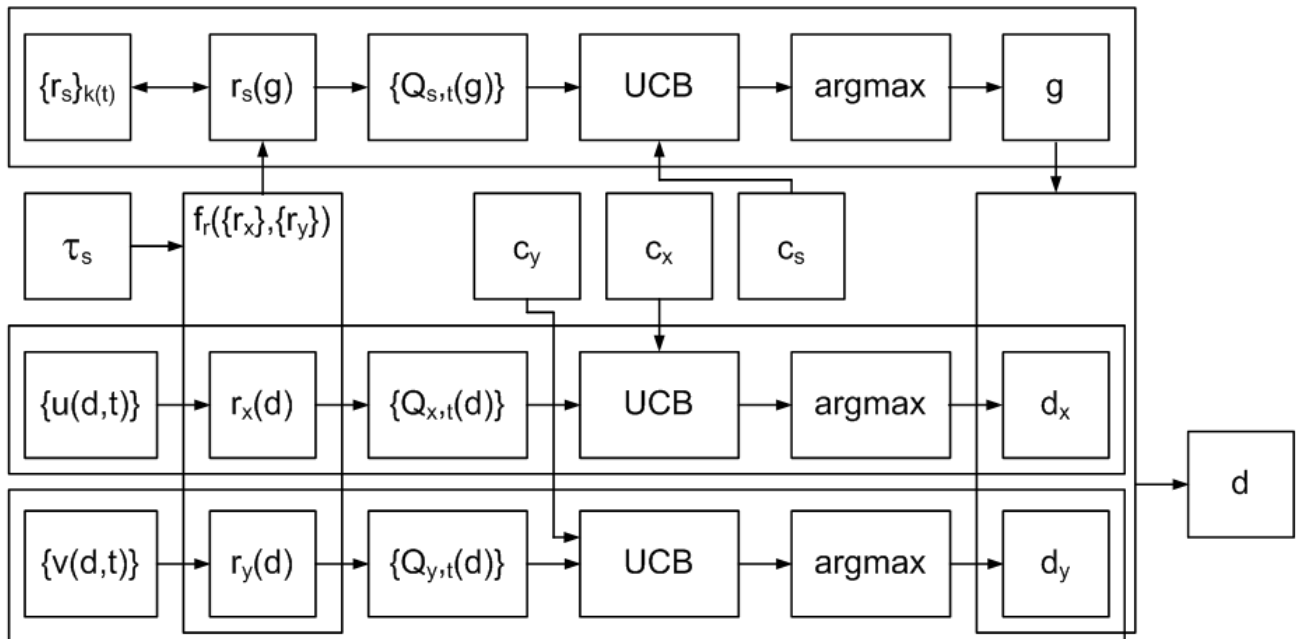


Рис. 2.6. Схема роботи МСА на основі верхньої довірчої межі (МСА-UCB)

2.3.2. Моделювання роботи методу структурної адаптації

Для моделювання роботи МСА використано модель у вигляді $M_{wt}=\{MAB_w, G_r\}$, де $MAB_w=\{MAB_{ul}, MAB_{ug}, R_w(d), \lambda\}$ – складене стаціонарне випадкове середовище (binary multi-armed bandid problem) з функцією виграшу $R_w(d)$, і $G_r=\{L, R_g(k)\}$ – однорідна симетрична гра з функцією виграшу $R_g(k)$. Функція виграшу $R_w(d)$ задається ймовірностями виграшу $\{p_r(d)\}_N$, такими що

$$R_w(d): p_r(d) = \lambda \times p_{u,g}(d) + (1 - \lambda) \times p_{u,l}(d), \quad (2.21)$$

де $p_{u,l}(d)$ – ймовірність виграшу в стаціонарному випадковому середовищі $MAB_{ul}=\{p_{u,l}(d)\}$, $p_{u,g}(d)$ – ймовірність виграшу в стаціонарному випадковому середовищі $MAB_{ug}=\{p_{u,g}(d)\}$, λ – ваговий коефіцієнт, який задає ступінь залежності функції виграшу $R_w(d)$ від виграшів у випадкових середовищах MAB_{ul} та MAB_{ug} .

За допомогою складеного стаціонарного випадкового середовища MAB_w моделюється отримання інформації ВО-процесами з джерел інформації та переключення між ними в режимі A_w . Випадкове середовище MAB_w представлено у вигляді комбінації двох випадкових середовищ: MAB_{ul} , за допомогою якого моделюється локальна складова адаптації ВО-процесу без врахування структури зв'язків між джерелами інформації, і MAB_{ug} , за допомогою якого моделюється глобальна складова адаптації ВО-процесу з врахуванням структури зв'язків між джерелами інформації. Ваговим коефіцієнтом λ задається ступінь залежності функції виграшу $R_w(d)$ у випадковому середовищі MAB_w від виграшів у випадкових середовищах MAB_{ul} та MAB_{ug} . За допомогою однорідної симетричної гри G_r моделюється отримання інформації ВО-процесами про структуру зв'язків між джерелами $C(D)$ та переключення між джерелами інформації в режимі A_r . Якщо на кроці t колективні дії ВО-процесів у однорідній симетричній грі G_r принесли виграш, то у випадковому середовищі MAB_w ВО-процесам нараховуються локальні виграші з ймовірністю $p_r(d)$, інакше в разі програшу у грі G_r у випадковому середовищі MAB_w ВО-процесам нараховуються локальні виграші з ймовірністю $p_{u,l}(d)$. В такий спосіб моделюються різні адаптаційні

можливості ВО-процесів з огляду на наявність чи відсутність інформації про структуру зв'язків між джерелами інформації.

В однорідній симетричній грі $G_r = \{L, R_g(k)\}$ вибір ВО-процесом джерела інформації d з деяким параметром $h_i(d)$ еквівалентний вибору стратегії $h_i \in H_g$. В найпростішому випадку $H_g = \{h_1, h_2\}$ і виграш $r \in \{0;1\}$. Тоді гра G_r задається функцією виграшу $R_g(k)$ ($0 < k < 1$, $0 < R_g(k) < 1$), де $R_g(k)$ – математичне сподівання виграшу кожного гравця (ВО-процесу) в партії гри, в якій kN гравців обрали стратегію h_1 і $(1-k)N$ – стратегію h_2 . В якості функції $R_g(k)$ обрано кусково-постійну функцію [8, 9]: 1) значення k розбиваються на однакові інтервали $K_i = (k_i, k_{i+1})$, $i=1, \dots, L$; 2) кожному інтервалу відповідає своє математичне сподівання виграшу $R_g(K_i)$. На кожному кроці t розігрується одна партія гри G_r , в якій кожному гравцю (ВО-процесу) в залежності від його вибору нараховується виграш $r_{y,i}(d) \in \{0;1\}$.

Ефективність роботи МСА (окремо у варіантах МСА-softmax та МСА-UCB) та параметричних методів адаптації ВО-процесів оцінювалась як

$$w(Q) = Q / Q_{wr}, \quad (2.22)$$

де $Q = F_x(T)$ – середній по часу виграш адаптивного ВО-процесу в випадковому середовищі MAW_w на кроці T (усереднений по всіх ВО-процесах):

$$Q = \frac{1}{N} \sum_A \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T r_{x,i}(d) \right], \quad (2.23)$$

Q_{wr} – максимально можливий середній по часу виграш у випадковому середовищі MAW_w :

$$Q_{wr} = \frac{1}{N} \sum_A (\max\{p_r(d)\}_{D_a}), \quad (2.24)$$

де D_a – підмножина дій (джерел інформації), доступних даному ВО-процесу $p(a)$ для вибору.

В ході моделювання досліджено роботу чотирьох методів адаптації ВО-процесів (рис. 2.7– рис. 2.10): 1) метод структурної адаптації на основі нормованої експоненційної функції (MSA-softmax), 2) метод структурної адаптації на основі

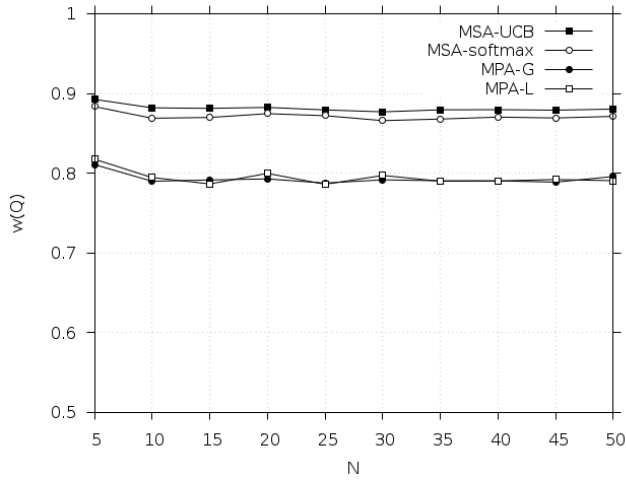


Рис. 2.7. Результати моделювання
роботи МСА, $\lambda=0.6$, $M=4N$,
 $T=1000$, $n=10000$

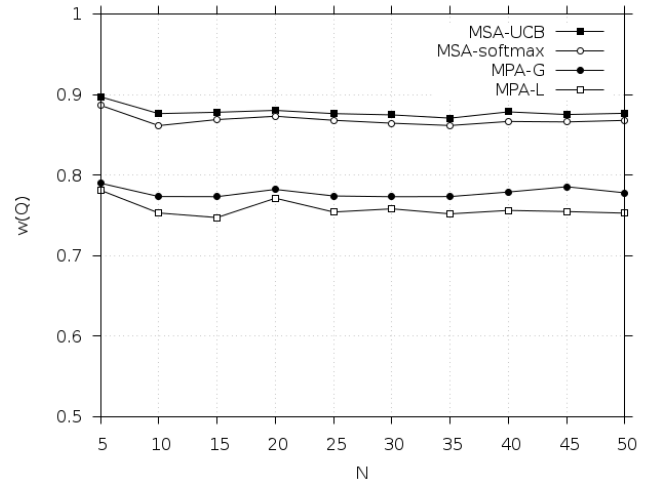


Рис. 2.8. Результати моделювання
роботи МСА, $\lambda=0.7$, $M=4N$,
 $T=1000$, $n=10000$

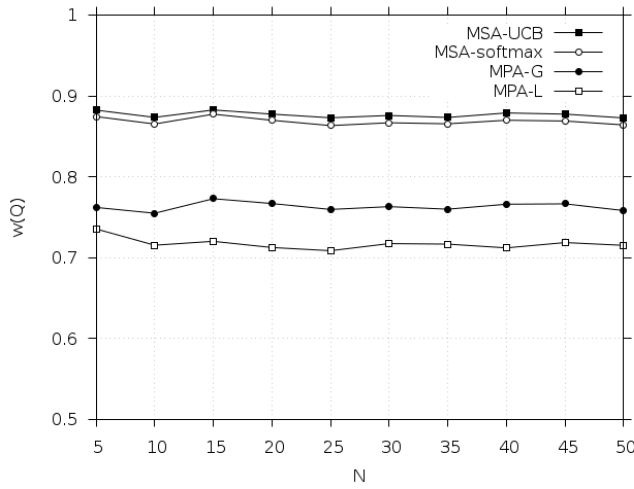


Рис. 2.9. Результати моделювання
роботи МСА, $\lambda=0.8$, $M=4N$,
 $T=1000$, $n=10000$

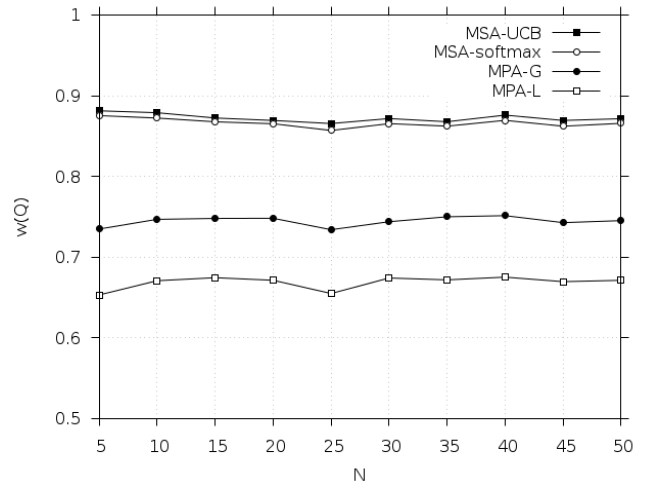


Рис. 2.10. Результати моделювання
роботи МСА, $\lambda=0.9$, $M=4N$,
 $T=1000$, $n=10000$

оцінки верхньої довірчої межі (MSA-UCB), 3) метод параметричної адаптації з локальною оптимізацією (MPA-L), 4) метод параметричної адаптації з глобальною оптимізацією (MPA-G). Моделювання роботи методів адаптації (рис. 2.7 – рис. 2.10) показало перевагу методу структурної адаптації над методами параметричної адаптації ВО-процесів. При цьому перевага МСА над МПА зростає із зростанням залежності функції виграшу $R_w(d)$ у випадковому середовищі MAV_w від виграшу у випадковому середовищі MAV_{ug} (величина λ), тобто із зростанням ваги глобальної складової адаптації ВО-процесу з врахуванням структури зв'язків між джерелами інформації. Параметри обчислювального експерименту (рис. 2.7 – рис. 2.10) наступні: кількість часових кроків в одному експерименті $T=1000$, кількість повторень експерименту (реплік експерименту) $n=10000$, $c=2.0$ (MSA-UCB), $\mu=0.05$ (MSA-softmax), $\tau=10$ (MSA), $N=\{5-50\}$, $M=4N$. В середньому для різних комбінацій параметрів задачі автономних розподілених досліджень та відповідних параметрів експерименту ($M=\{100, \dots, 2000\}$, $N=\{5, \dots, 100\}$, $\lambda=\{0.6, 0.7, 0.8, 0.9\}$) середня кількість зібраної інформації за один крок для МСА на 23.2% більше ніж для МПА.

2.3.3. Розрахунок та оцінка обчислювальних витрат на роботу МСА

Розрахунок та оцінку обчислювальних витрат на роботу МСА та методів-аналогів виконано для одного циклу управління методу адаптації. Зокрема визначено: 1) кількість операцій (об'єм обчислень) $V_s(k)$ в одному циклі управління, 2) кількість кроків обчислень $V_t(k, p)$ в одному циклі управління для заданого показника розпаралелення p (кількості паралельних обчислювачів або потоків для одного ВО-процесу).

В якості об'єму вхідних даних взято кількість джерел інформації, які припадають на один адаптивний ВО-процес $k=M/N$ (тобто середню кількість дій для одного ВО-процесу, параметри яких обраховуються у відповідних блоках навчання з підкріпленням). Основні типи обчислень в блоках навчання з підкріпленням це: 1) перерахунок оціночної ваги дії $Q_t(d)$ (асимптотична складність $O(1)$), 2) перерахунок ймовірностей вибору дій (асимптотична

складність $O(1)$), 3) випадковий вибір дії (асимптотична складність $O(1)$), 4) пошук максимуму при виборі наступної дії (асимптотична складність $O(k)$). Відтак алгоритм, який реалізує роботу MSA і складається з деякої кількості блоків навчання з підкріпленням має лінійну асимптотичну складність $O(k)$, де k – кількість дій (джерел інформації) доступних окремому ВО-процесу для вибору.

Кількість операцій (об'єм обчислень) $V_s(k)$ в одному циклі управління визначено як

$$V_s(k) = w_1 s_1 + w_2 s_2 + w_3 s_3, \quad (2.25)$$

де s_1 – кількість операцій додавання, віднімання, порівняння, s_2 – кількість операцій множення, ділення, генерування випадкового числа, s_3 – кількість операцій піднесення до степеня, добування кореня, логарифмування; w_1, w_2, w_3 – відповідні коефіцієнти масштабування обчислювальних витрат на виконання операцій. Розглянуто два варіанта значень коефіцієнтів масштабування: 1) $w_1 = w_2 = w_3 = 1$, 2) $w_1 = 1, w_2 = 10, w_3 = 50$.

Кількість кроків обчислень $V_t(k,p)$ в одному циклі управління для заданого показника розпаралелення p визначено як

$$V_t(k,p) = V_s(k) / S_p(\alpha,p), \quad (2.26)$$

де α – частка всіх операцій, які виконуються послідовно; $V_p(k) = (1-\alpha)V_s(k)$ – кількість операцій, які можуть бути виконані паралельно; $S_p(\alpha,p)$ – прискорення обчислень за рахунок розпаралелення (розраховується відповідно до закону Амдала):

$$S_p(\alpha,p) = 1 / \{ \alpha + [(1-\alpha)/p] \}. \quad (2.27)$$

При розрахунку та оцінці $V_t(k,p)$ також враховувались різні типи операцій $\{s_1, s_2, s_3\}$ та відповідні два варіанти значень коефіцієнтів масштабування $\{w_1, w_2, w_3\}$.

В табл. 2.1–2.4. наведено результати розрахунку та оцінки обчислювальних витрат на роботу 1) методу структурної адаптації на основі нормованої експоненційної функції (MSA-softmax), 2) методу структурної адаптації на основі оцінки верхньої довірчої межі (MSA-UCB), 3) методу параметричної адаптації з локальною оптимізацією (MPA-L), 4) методу параметричної адаптації з

глобальною оптимізацією (MPA-G). Зокрема в табл. 2.1. наведено кількість операцій $V_s(k)$ в одному циклі управління (V_s – розрахована величина, V_s^* – оцінка отримана експериментально в результаті моделювання роботи методів) для коефіцієнтів масштабування $w_1 = w_2 = w_3 = 1$. В табл. 2.2. наведено кількість операцій $V_s(k)$ в одному циклі управління для коефіцієнтів масштабування $w_1 = 1$, $w_2 = 10$, $w_3 = 50$. В табл. 2.3. наведено кількість кроків обчислень $V_t(k,p)$ в одному циклі управління (V_t – розрахована величина, V_t^* – оцінка отримана експериментально в результаті моделювання роботи методів) для $k = 30$ та коефіцієнтів масштабування $w_1 = w_2 = w_3 = 1$. В табл. 2.4. наведено кількість кроків обчислень $V_t(k,p)$ в одному циклі управління для $k = 30$ та коефіцієнтів масштабування $w_1 = 1$, $w_2 = 10$, $w_3 = 50$.

Таблиця 2.1.

Кількість операцій $V_s(k)$ в одному циклі управління для різних методів адаптації ВО-процесів, $w_1 = w_2 = w_3 = 1$
(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	23	17.3	43	32.4	63	47.5	83	62.1	103	77.9
MPA-G	23	18.2	41	31.6	59	45.1	77	58.7	95	72.1
MSA-softmax	132	127.4	235	222.6	331	317.5	433	411.9	534	506.9
MSA-UCB	105	99.4	185	174.5	265	249.5	345	324.2	425	398.8

Таблиця 2.2.

Кількість операцій $V_s(k)$ в одному циклі управління для різних методів адаптації ВО-процесів, $w_1 = 1$, $w_2 = 10$, $w_3 = 50$
(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

Згідно з отриманими результатами методи структурної адаптації ВО-процесів (MSA-softmax, MSA-UCB) потребують більших обчислювальних витрат

ніж методи параметричної адаптації (MPA-L, MPA-G). Найбільших обчислювальних витрат потрібно на роботу методу структурної адаптації на основі оцінки верхньої довірчої межі (MSA-UCB) за рахунок використання в цьому методі операцій добування кореня та логарифмування при виборі наступної дії у відповідному методі навчання з підкріпленням. Крім цього з отриманих результатів видно, що методи структурної адаптації ВО-процесів (MSA-softmax, MSA-UCB) мають великий потенціал для розпаралелення їх роботи. В середньому ($k=\{10,\dots,50\}$, $w_1=1$, $w_2=10$, $w_3=50$) кількість обчислювальних витрат на роботу MSA (в розрахунку на один цикл управління) більше на 42.3% в порівнянні з МПА.

Таблиця 2.3.

Кількість кроків обчислень $V_t(k,p)$ в одному циклі управління, $k=30$,
 $w_1 = w_2 = w_3 = 1$ (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	44.3	45.9	39.7	41.6	37.1	40.8	35.8	40.7	35.1	40.6
MPA-G	42.5	43.3	35.8	39.2	33.2	38.9	31.9	38.4	31.1	38.3
MSA-softmax	226.9	238.6	174.0	199.5	156.3	185.9	147.5	179.9	142.1	174.8
MSA-UCB	157.9	169.4	104.5	129.9	86.6	116.7	77.7	110.0	72.3	105.2

Таблиця 2.4.

Кількість кроків обчислень $V_t(k,p)$ в одному циклі управління, $k=30$,
 $w_1 = 1$, $w_2 = 10$, $w_3 = 50$ (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

2.3.4. Оцінка надійності та живучості

Для оцінки надійності роботи методу структурної адаптації використано коефіцієнт збереження ефективності K_Q , який належить до комплексних показників надійності і є відношенням фактичного значення показника

ефективності роботи системи з врахуванням відмов Q_v до номінального значення цього показника за відсутності відмов Q_n на деякому проміжку часу:

$$K_Q = Q_v / Q_n. \quad (2.28)$$

Цей показник зручний тим, що дозволяє характеризувати ступінь впливу відмов елементів системи на ефективність її роботи. В даному випадку під елементом системи розуміється окремий адаптивний ВО-процес, а під системою – колектив адаптивних ВО-процесів. Надійність роботи методів адаптації визначено шляхом моделювання їх роботи за наявності відмов окремих ВО-процесів. В роботі використано модель відмов у вигляді стаціонарного пуассонівського потоку відмов з інтенсивністю потоку λ_p . В якості показника ефективності взято $Q=F_x(T)$ – середній по часу виграш адаптивного ВО-процесу у випадковому середовищі MAV_w на кроці T (усереднений по всіх ВО-процесах) як оцінку кількості інформації I_T , зібрану колективом ВО-процесів на протязі часу T (Q_v – з врахуванням відмов ВО-процесів, Q_n – за відсутності відмов ВО-процесів). В табл. 2.5. наведено значення коефіцієнтів збереження ефективності K_Q методу структурної адаптації (MSA-softmax, MSA-UCB) та методів параметричної адаптації (MPA-L, MPA-G) для різних значень інтенсивності потоку відмов ВО-процесів λ_p . Як видно з табл. 2.5. надійність роботи методу структурної адаптації вище за надійність роботи методів параметричної адаптації. В середньому для різних комбінацій значень ($M=\{100, \dots, 2000\}$, $N=\{10, \dots, 100\}$, $\lambda=\{0.6, 0.7, 0.8, 0.9\}$) MSA за надійністю роботи переважає MPA на 21.1%.

Таблиця 2.5.

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

	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

Під живучістю системи в загальному розуміють здатність системи пристосовуватись до нових і, як правило, непередбачуваних (аварійних) ситуацій, протистояти шкідливим впливам, виконуючи при цьому свою цільову функцію за рахунок відповідної зміни структури і поведінки системи. Висока живучість колективу адаптивних ВО-процесів обумовлена децентралізованою організацією їх спільної роботи. Навіть у разі масових раптових відмов ВО-процесів колектив продовжить свою роботу доти, доки хоча б один ВО-процес буде працездатним. На противагу цьому в системах з централізованою організацією раптова відмова ключових елементів з високою ймовірністю призводить до зупинки всієї системи.

Для кількісної оцінки живучості колективу ВО-процесів, робота яких організована за методом структурної адаптації, в роботі використано коефіцієнт швидкості відновлення K_R ефективної роботи колективу після раптової одночасної відмови $N_x < N$ ВО-процесів. Значення коефіцієнту K_R для різних $p_v = N_x/N$ визначається шляхом моделювання роботи методів адаптації за наступним сценарієм. Після досягнення показником ефективності роботи $Q = F_x(T_1)$ номінального значення за відсутності відмов $Q_n(N)$, в момент часу T_1 моделюється раптова одночасна відмова $N_x < N$ ВО-процесів, які обираються випадково. Внаслідок цього відбувається різке зменшення показника ефективності роботи Q . Після цього вимірюється час $T_R(N - N_x)$, на протязі якого колективу ВО-процесів вдається відновити ефективність роботи до номінального значення показника ефективності за відсутності відмов $Q_n(N - N_x) < Q_n(N)$. Коефіцієнт швидкості відновлення K_R визначається як

$$K_R(p_v) = [T_0(N - N_x) - T_R(N - N_x)] / T_0(N - N_x), \quad (2.29)$$

де $p_v = N_x/N$, а $T_0(N - N_x)$ – час, за який колективу ВО-процесів вдається досягнути номінального значення показника ефективності за відсутності відмов $Q_n(N - N_x)$ від початку роботи. $T_0(N - N_x)$ вимірюється в окремому експерименті з тими самими параметрами (окрім величини N , яка в цьому експерименті дорівнює $N - N_x$). Завдяки тому, що при відновленні ефективності роботи використовується «досвід», здобутий ВО-процесами до моменту часу T_1 , в середньому в переважній більшості випадків: $T_R(N - N_x) < T_0(N - N_x)$.

В табл. 2.6. наведено значення коефіцієнтів швидкості відновлення K_R методу структурної адаптації (MSA-softmax, MSA-UCB) та методів параметричної адаптації (MPA-L, MPA-G) для різних значень p_v . Як видно з табл. 2.6. живучість колективу ВО-процесів, робота яких організована за методом структурної адаптації, переважає живучість колективу ВО-процесів, робота яких організована за методом параметричної адаптації. При цьому обравши деяке порогове значення $K_R = K^*$, за допомогою табл. 2.6. можна визначити при яких значеннях $p_v = N_x/N$ колектив ВО-процесів не встигає відновити ефективну роботу за прийнятний час. В середньому для різних комбінацій значень ($M = \{100, \dots, 2000\}$, $N = \{10, \dots, 100\}$, $\lambda = \{0.6, 0.7, 0.8, 0.9\}$) коефіцієнт швидкості відновлення для МСА більший ніж для МПА на 18.4%.

Таблиця 2.6.

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

2.4. Метод координації вимірювально-обчислювальних процесів на основі відкладеної у часі інформаційної взаємодії

2.4.1. Розробка методу координації ВОП на основі відкладеної у часі інформаційної взаємодії

Розглянемо проблему розробки методу координації, який би дозволив підняти ефективність реалізації запропонованого методу структурної адаптації ВО-процесів у автономних розподілених системах за рахунок «приховування» деталей координаційної взаємодії низького рівня та забезпечення взаємного виключення при виборі дослідницьких дій та стійкість координації до відмов ВО-процесів і можливих втрат координуючих повідомлень. На основі аналізу

існуючих підходів до вирішення подібних проблем можна запропонувати рішення, яке базується на принципі відкладеної у часі інформаційної взаємодії [61-67]. Цей принцип передбачає використання деякого об'єкта-посередника, якому лишається інформаційне повідомлення для якогось майбутнього отримувача. При цьому оскільки факт майбутнього отримання повідомлення є, як правило, недетермінованим, а об'єм пам'яті об'єкта-посередника є обмеженим, то додатково вводять процедуру видалення тих повідомлень з пам'яті об'єкта-посередника, які не були отримані за деякий заданий проміжок часу.

Сучасний розвиток технологій багато-агентних систем, особливо в частині опису та дослідження феномена емерджентної поведінки (emergent behavior), потребує нового погляду на проблему опису та аналізу сумісної історії поведінки автономних агентів з можливістю визначення закономірностей їх взаємозв'язку. Однак на даний час більшість підходів в цьому напрямку або взагалі не розглядає цей аспект, або розглядає його на одному рівні з іншими аспектами. Тому існує потреба в такому підході, в якому б було сконцентровано увагу саме на сумісній історії взаємодій автономних агентів і на вплив цієї історії на ті можливості, які є у колективу в майбутньому. Для вирішення цієї актуальної проблеми можна запропонувати підхід під назвою – багато-агентна обумовлена взаємодія, в рамках якого розроблено метод координації адаптивних ВО-процесів на основі принципу відкладеної у часі інформаційної взаємодії. Відтак розглянемо та визначимо 1) загальні принципи цього підходу; 2) спосіб опису схем багато-агентної обумовленої взаємодії (в тому числі на основі координаційного простору); 3) спосіб задання правил, що регулюють поведінку автономних агентів в рамках цього підходу і забезпечують можливість емерджентної колективної поведінки.

2.4.2. Координаційна модель організації адаптивних ВО-процесів

Для побудови координаційної моделі організації адаптивних ВО-процесів використаємо концепцію багато-агентної обумовленої взаємодії [61-67]. Концепція багато-агентної обумовленої взаємодії може бути сформульована

наступним чином. 1) Усі події розгортаються в дискретному часі та дискретному розподіленому координаційному просторі з деякою наперед заданою структурою (вершини поєднані ребрами), який зберігається у вигляді розподіленої структури даних на всіх вузлах АРС. 2) Усі ВО-процеси без зупинки рухаються в координаційному просторі (за один такт ВО-процес може перейти з даної вершини координаційного простору в одну з її сусідніх вершин), що еквівалентно відправці кожним ВО-процесом в кожному такті відповідного координаційного повідомлення, яким вносяться зміни у структури даних координаційного простору. 3) Кожний ВО-процес залишає в координаційному просторі «слід» заданої довжини, який відображає пройдений ним в координаційному просторі шлях, тобто для координуючих повідомлень кожного ВО-процесу виконується їх асинхронна реплікація із заданим часом зберігання кожної репліки у вершинах координаційного простору. 4) Один ВО-процес не може піти в координаційному просторі по «сліді» іншого ВО-процесу. 5) В початковий момент часу усі ВО-процеси починають рух з різних вершин координаційного простору.

З точки зору обумовленої взаємості в даному випадку можна виділити два основних аспекти:

1) Сильне зумовлювання (зовнішній локус контролю) – доступні окремому ВО-процесу можливості вибору в координаційному просторі залежать від того, що він та інші ВО-процеси вибирали в минулому. Історія цих попередніх виборів представлена явним чином у вигляді системи «слідів», які залишили ВО-процеси у координаційному просторі. При цьому, змінюючи задану довжину «сліді», ми можемо змінювати часову глибину зумовлювання. Наявні можливості для вибору в даному випадку представлені явним чином у вигляді вільного від «слідів» простору.

2) Слабке зумовлювання (внутрішній локус контролю) – вибір окремого ВО-процесу може залежати від того, що саме вибрали інші ВО-процеси в даній вершині координаційного простору. Тобто перетинаючи «слід» іншого ВО-процесу, даний ВО-процес може враховувати його напрям і «силу» при прийнятті свого наступного рішення щодо переміщення в координаційному просторі. Крім

того в ситуації, коли таких слідів декілька, може враховуватись конфігурація їх взаємоперетину.

2.4.3. Способи опису та реалізації координаційного простору

З врахуванням наведених у п.2.2.1 вимог до ітераційних процедур прийняття рішення у складі адаптивного ВО-процеса $p(a_i)$ та цілей організації колективу $\{p(a_i)\}$ можна запропонувати механізм координації спільних узгоджених дій адаптивних ВО-процесів на основі методу координації незалежних процесів прийняття рішення за допомогою координаційного простору [61-67]. Механізм координації складається з компонент (\mathbf{M}, \mathbf{A}) та правил $(\mathbf{RM}, \mathbf{RA})$. Під \mathbf{M} розуміється деякий координаційний простір (рис. 2.11), в структурі якого відображається проблематика організації адаптивних ВО-процесів з точки зору 1) можливих конфліктів за володіння часткою обчислювальних та комунікаційних ресурсів; 2) узгодження спільних дій щодо вибору джерел інформації (вирішення проблеми взаємного виключення, забезпечення заданої схеми взаєморозміщення в фізичному чи параметричному просторі об'єкту дослідження та ін.). Під \mathbf{A} розуміється множина ВО-процесів $\{p(a_i)\}$, які «розміщені» в координаційному просторі \mathbf{M} . При цьому $\mathbf{M} = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$, де $\mathbf{V} = \{v\}$ – множина вершин (точок прийняття рішення щодо вибору наступного джерела інформації), а $\mathbf{E} = \{e\}$ – множина ребер $e = \{v_i, v_j\}$, $i \neq j$, які поставлені у відповідність до джерел інформації. Відповідно проходження ВО-процесу $p(a_i)$ по ребру e означає отримання інформації з відповідного джерела. Для кожного вузла задається кортеж

$$(E(v), C(v), S_i(v), D_i(v), Q_i(v)), \quad (2.30)$$

де

$E(v) = \{e_1, e_2, \dots, e_{n(v)}\}$, – множина ребер, які належать до даного вузла v , $n(v)$ – кількість таких ребер;

$C(v) = \{c_1, c_2, \dots, c_{m(v)}\}$ – множина всіх можливих пар ребер (способів «проходження» даного вузла), таких що $c_k = (e_i, e_j), i \neq j, e_i, e_j \in E(v)$ для вузла v ,

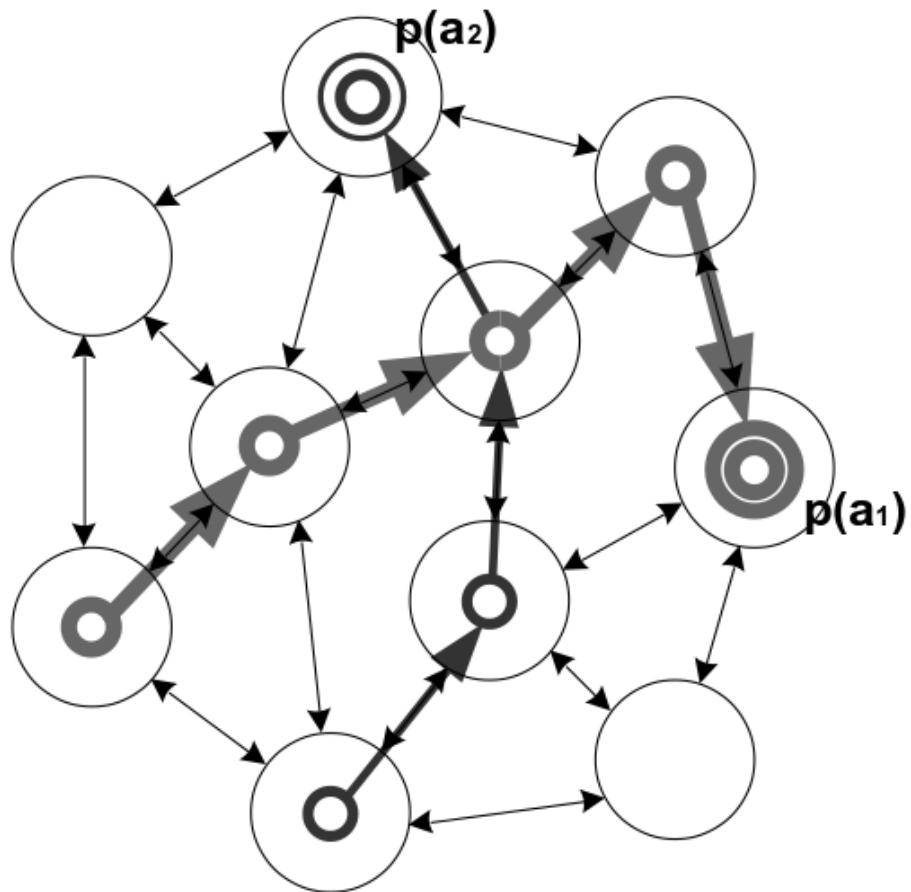


Рис. 2.11. Приклад ділянки координаційного простору M з двома ВО-процесами $(p(a_1), p(a_2))$, які переміщуються в його вершинах, лишаючи за собою слід ($h(a_1) = 4, h(a_2) = 3$)

$m(v)$ – кількість усіх таких пар ребер, при цьому $C(v, e_i) \in C(v)$ – множина усіх пар ребер, які містять ребро e_i ;

$S_t(v) = \{s_t(c_1), s_t(c_2), \dots, s_t(c_{m(v)})\}$ – множина станів всіх можливих пар ребер для вузла v в момент часу t (нульове значення означає, що відповідний «прохід» закрито), де $s_t(c_k) \in \{0; 1\}$ – стан пари ребер c_k в момент часу t , такий що якщо $s_t(c_k) = 0$, то пара ребер c_k є закритою (тобто даний спосіб проходу вузла не доступний ВО-процесу), і якщо $s_t(c_k) = 1$, то пара ребер c_k є відкритою (тобто даний спосіб проходу вузла доступний ВО-процесу); при цьому $S_t(v, e_i)$ – множина станів усіх пар ребер, в які входить ребро e_i ;

$D_t(v) = \{d_t(e_1), d_t(e_2), \dots, d_t(e_{n(v)})\}$ – множина індикаторів величини вибору (показує кількість «виходів» з вершини для кожного «входу»), кожний з них визначається по формулі

$$d_t(e_i) = \sum s_t(c_j), \text{ по всім } c_j \in C(v, e_i); \quad (2.31)$$

тобто індикатор величини вибору $d_t(e_i)$ рівний сумі станів усіх пар ребер, які містять дане ребро e_i для вузла v ; ця величина показує кількість доступних ВО-процесу варіантів вибору у вузлі v , при умові що він «зайшов» в цей вузол по ребру e_i ; якщо $d_t(e_i) = 0$, то вихід з вузла v по ребру e_i є тимчасово неможливим, оскільки усі відповідні пари ребер закриті; якщо $d_t(e_i) = 1$, то вибору як такого також нема, оскільки для проходу через вузол v по ребру e_i відкрита лише одна відповідна пара ребер;

$Q_t(v) = \{q_t(c_1), q_t(c_2), \dots, q_t(c_{m(v)})\}$ – множина значень лічильників часу, які визначають кількість тактів, що лишилася до «відкриття» відповідного закритого «проходу», якщо $s_t(c_k) = 1$ (тобто пара ребер c_k відкрита), то $q_t(c_k) = 0$ [61-67].

Для кожного ВО-процесу $p(a_i)$ задається кортеж

$$(x_0(a), x_t(a), s_t(a), h(a), f_a), \quad (2.32)$$

де $x_0(a)$ – початкове розміщення $p(a_i)$ в координаційному просторі, $x_t(a)$ – біжуча вершина, в якій знаходиться $p(a_i)$, $s_t(a)$ – стан $p(a_i)$, який визначає чи може даний $p(a_i)$ продовжувати рух в координаційному просторі, $h(a)$ – довжина сліду, який лишає за собою $p(a_i)$ у вершинах координаційного простору, f_a – функція

вибору $p(a_i)$ наступного вузла: $x_{t+1} = f_a(x_t, y_t)$, де y_t – вектор індикаторів можливостей переходу, таких що

$$y_t = \{\delta_t(e_i)\}, e_i \in E(x_t, I(x_t)), \quad (2.33)$$

де $I(x_t)$ – множина вузлів інцидентних до вузла x_t , з якої виключено вузол x_{t-1} , $E(x_t, I(x_t))$ – множина усіх ребер, які поєднують вузол x_t з вузлами з множини $I(x_t)$; тобто якщо $e_i \in E(x_t)$ і $e_i \in E(I(x_t))$, то $e_i \in E(x_t, I(x_t))$, і $\delta_t(e_i)$ – індикатор можливості переходу, такий що

$$\delta_t(e_i) = 0, \text{ якщо } d_t(e_i) = 0, \quad (2.34)$$

$$\delta_t(e_i) = 1, \text{ якщо } d_t(e_i) > 0,$$

де кожний індикатор величини вибору $d_t(e_i)$ рівний кількості доступних ВО-процесу варіантів вибору в наступному такті $t+1$, якщо в даному такті t він перейде в сусідній вузол по ребру e_i [61-67].

2.4.4. Метод координації спільних узгоджених дій адаптивних ВО-процесів

Метод координації спільних узгоджених дій адаптивних ВО-процесів задається набором локальних правил: 1) $\mathbf{RM} = \{RM1, RM2, RM3\}$, які визначають зміну станів вершин (тобто стану координаційного простору), зокрема правило RM1 визначає ситуації «закриття проходу» через вершину (блокування відповідних варіантів вибору для ВО-процесу), правило RM2 визначає закономірність «випаровування» сліду (тобто час зберігання реплік координуючих повідомлень), який лишає $p(a_i)$ в координаційному просторі (порядок видалення відкладених у часі координуючих повідомлень, час зберігання яких вийшов), а правило RM3 визначає залежності між парами ребер одної вершини з точки зору їх «закриття» (вплив блокування одних варіантів вибору на інші), та 2) правилами $\mathbf{RA} = \{RA1, RA2, RA3, RA4, RA5\}$, які визначають спосіб переміщення $p(a_i)$ в координаційному просторі та зміну його станів. Правило RA1 визначає, що усі $p(a_i)$ починають рух у координаційному просторі з різних вершин. Правило RA2 визначає, що на даному кроці $p(a_i)$ не

може повернутися в ту вершину, з якої він вийшов на попередньому кроці. Правило RA3 визначає, що кожний $p(a_i)$ повинен в кожному такті обов'язково здійснити перехід при наявності такої можливості. Правило RA4 визначає поведінку декількох $p(a_i)$, які одночасно потрапили до однієї вершини (вирішення проблеми взаємного виключення). Правило RA5 визначає поведінку $p(a_i)$, який заблокований у вершині, внаслідок відсутності «виходів» (варіантів вибору), тобто не може продовжувати переміщення в координаційному просторі [61-67]. Розглянемо зазначені правила більш детально.

RM1 – правило зміни станів пар ребер $C(v)$ в залежності від переміщень ВО-процесів у координаційному просторі. Для кожного вузла координаційного простору v : якщо $e_i \in E(v)$ – ребро, по якому ВО-процес увійшов до вузла або вийшов з нього у момент часу t , то

для всіх c_k таких, що $c_k \in C(v, e_i)$,
встановити 1) $s_t(c_k)=0$, 2) $q_t(c_k)=h(a)$.

RM2 – правило «випаровування сліду» (правило зміни стану вузла у часі як відображення роботи процедури видалення відкладених у часі координуючих повідомлень, час зберігання яких вийшов). В кожному такті значення лічильника $q_t(c_k)$ кожної закритої пари ребер c_k , (тобто пари ребер, для якої $s_t(c_k)=0$) зменшується на одиницю. Якщо значення лічильника стає рівним нулю, то пара ребер переходить у стан «відкрито»: $s_t(c_k)=1$ (це значить, що «слід» ВО-процесу, що закривав дану пару ребер, остаточно «випарувався»).

Тобто для кожної пари ребер $c_k \in C(v)$ кожного вузла $v \in V$ в кожному такті виконується

якщо $q_t(c_k) > 0$, то $q_{t+1}(c_k) = q_t(c_k) - 1$.
якщо $q_{t+1}(c_k) = 0$, то $s_{t+1}(c_k) = 1$.

RM3 – правило зміни стану одних пар ребер в залежності від стану інших пар ребер. Між незалежними парами ребер з множини $C(v)$ можна ввести залежність (наприклад, у вигляді деякого предикату P^* , визначеного для ребер $e_i, e_j \in E(v)$), згідно якої якщо одна така пара ребер переходить у закритий стан, то інша також закривається. Таким чином може бути відображена специфіка предметної області,

що моделюється координаційним простором \mathbf{M} . Відповідно для кожного вузла v : якщо (e_i, e_j) , $i \neq j$, $e_i, e_j \in E(v)$ – пара ребер, по яким ВО-процес пройшов вузол в момент часу t (при цьому e_i – ребро, по якому ВО-процес увійшов у вузол, а e_j – ребро, по якому ВО-процес вийшов з вузла) і значення предикату $P^*(e_i, e_j)$ істинне, то

для всіх c_k таких, що $c_k \in C(v, e_l)$,
де e_l таке, що $P^*(e_i, e_l)$ істинне і $l \neq j$,
встановити 1) $s_t(c_k)=0$, 2) $q_t(c_k)=h(a)$.

Правила **RA** – правила переміщень та зміни станів ВО-процесів з множини A в залежності від стану вузлів координаційного простору \mathbf{M} в загальному випадку містять п'ять правил: $\mathbf{RA}=\{\mathbf{RA1}, \mathbf{RA2}, \mathbf{RA3}, \mathbf{RA4}, \mathbf{RA5}\}$.

RA1 (правило «рознесеного старту») – правило, згідно якому в початковий момент часу усі ВО-процеси починають рух у координаційному просторі з різних вузлів:

$$\forall (a_i, a_j), a_i, a_j \in A, i \neq j: x_0(a_i) \neq x_0(a_j).$$

RA2 (правило «тільки вперед») – правило, яке забороняє ВО-процесу повертатися назад по пройденому шляху, тобто повертатися в той вузол, з якого він прийшов в попередньому такті:

$$x_{t+1} \neq x_{t-1}, x_{t-1} \notin I(x_t).$$

RA3 (правило «ні кроку на місці») – правило, яке забороняє ВО-процесу «стояти на місці» в ситуації, коли в нього є можливість переміщуватись далі в координаційному просторі:

$$\text{якщо } \exists e_i \in E(x_t, I(x_t)): \delta_t(e_i)=1,$$

$$\text{то } x_{t+1} \neq x_t \ \& \ x_{t+1} \in I(x_t)$$

RA4 (правило «взаємного виключення») – правило, яке забороняє ВО-процесу вибирати той самий шлях, що і інший ВО-процес, який в даний момент часу знаходиться з ним в одному вузлі:

$$\text{якщо } \exists a_i, a_j \in A, i \neq j, \text{ таких що } x_{i,t} = x_{j,t},$$

$$\text{то } x_{i,t+1} \neq x_{j,t-1} \ \& \ x_{j,t+1} \neq x_{i,t-1} \ \& \ x_{i,t+1} \neq x_{j,t-1}$$

RA5 (правило «пастки») – правило, яке визначає ситуацію потрапляння ВО-процесу в «пастку», коли у ВО-процеса нема можливості перейти в інший вузол, а також ситуацію виходу ВО-процесу з «пастки», коли в нього з'являється така можливість:

Якщо в момент часу t у вузлі v знаходиться один $p(a_i)$ ($N(v)=1$), то

якщо $s_t(a)=1$ & ($\forall e_i \in E(x_t, I(x_t)): \delta_t(e_i)=0$), то встановити $s_t(a)=0$,

якщо $s_t(a)=0$ & ($\exists e_i \in E(x_t, I(x_t)): \delta_t(e_i)=1$), то встановити $s_t(a)=1$,

Інакше, якщо в момент часу t у вузлі знаходяться більше одного $p(a_i)$ ($N(v)>1$), то з врахуванням того, що $\Lambda = \sum \delta_t(e_i)$ по всім $e_i \in E(x_t, I(x_t))$,

якщо $\Lambda < N(v)$, то $\forall a \in A(v)$ встановити $s_t(a)=0$

якщо ($\exists a \in A(v): s_t(a)=0$) & ($\Lambda \geq N(v)$), то встановити $s_t(a)=1$.

Ідея використання даного методу координації полягає у тому, що він

- 1) забезпечує взаємне виключення ВО-процесів при виборі джерел інформації;
- 2) забезпечує зниження надлишкової інформації, яку збирають $p(a_i)$ за рахунок використання «слідів» (в даному випадку ми припускаємо, що, після відвідування джерела, інформації в ньому залишається мало, або вона зовсім зникає на деякий час);
- 3) забезпечує вирішення конфліктів щодо використання обчислювальних, комунікаційних та енергетичних ресурсів за допомогою блокування $p(a_i)$ у вершинах. Зауважимо, що додатковим елементом координації в даному випадку може виступати змінна довжина сліду, вибір величини якої можна делегувати $p(a_i)$. Таким чином можна розглядати задачу адаптації довжин сліду $p(a_i)$ в різних ділянках координаційного простору в залежності від вигляду функцій $u(d,t)$ для відповідних джерел.

Робота запропонованого методу координації адаптивних ВО-процесів була досліджена та відтестована за допомогою розробленої програмної системи моделювання. Зокрема за допомогою даної системи моделювання була відлагоджена логіка роботи різних сценаріїв використання методу координації адаптивних ВО-процесів (рис. 2.12, 2.13).

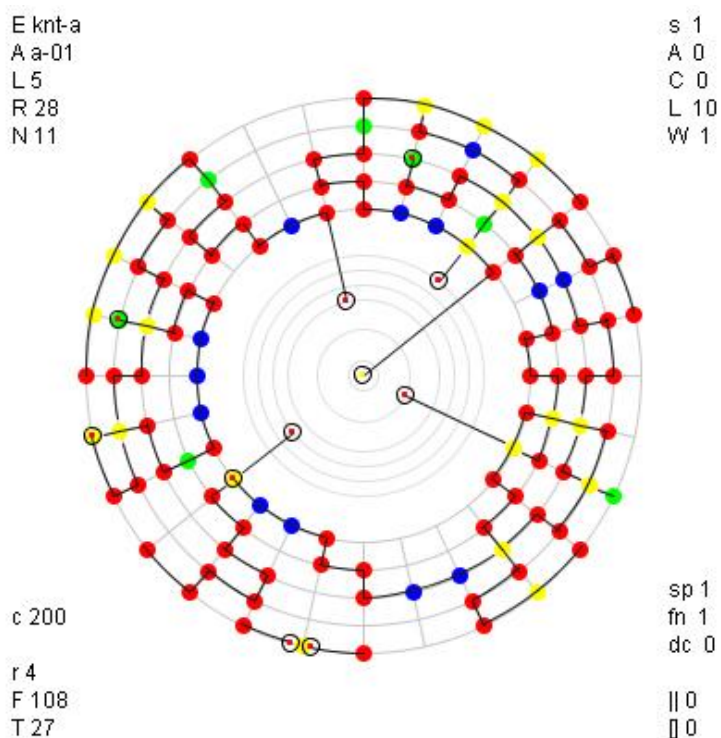


Рис. 2.12. Моделювання роботи методу з використанням координатної гри [61-63]: приклад 1

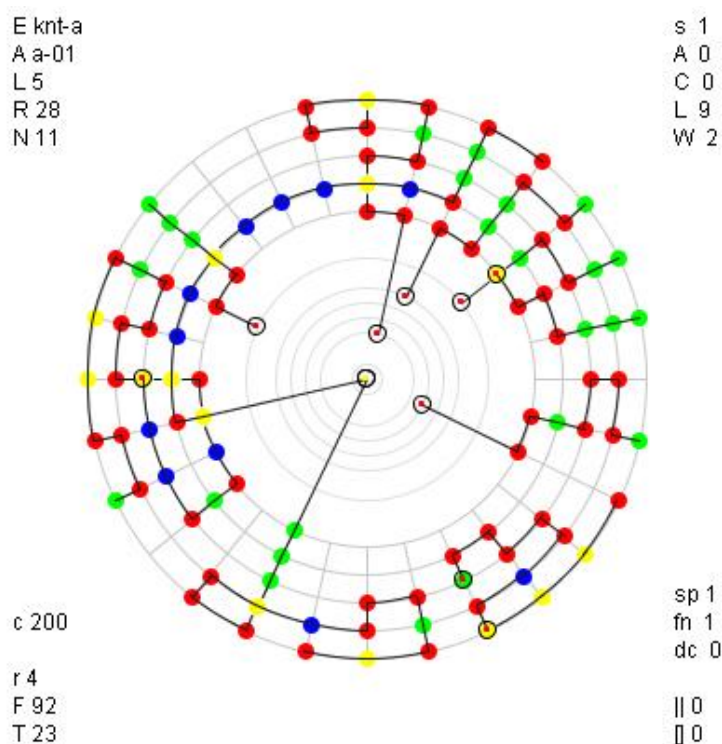


Рис. 2.13. Моделювання роботи методу з використанням координатної гри [61-63]: приклад 2

2.5. Спосіб локального управління адаптивним вимірювально-обчислювальним процесом на основі методу координації

Виходячи з концепції структурної адаптації [23,67] можна запропонувати наступний спосіб локального управління адаптивним ВО-процесом та відповідний алгоритм (рис. 2.14).

На початку роботи ВО-процес ініціалізує свої структури даних для збереження службових моделей $M(O)$, $C(D)$ та координаційного простору M . Після цього визначається початкове джерело інформації (наприклад, в результаті виконання процедури початкового розміщення вимірювальних агентів в просторі об'єкту дослідження) та відповідна йому вершина координаційного простору.

Далі в кожному такті своєї роботи $p(a_i)$ отримує інформацію з джерела; доповняє службові моделі $M(O)$, $C(D)$ та визначає приріст інформації $u(d,t)$, $v(d,t)$ (при необхідності здійснюючи обмін інформацією з іншими $p(a_i)$ та виконуючи відповідні попередні обчислення; на цьому ж етапі може здійснюватись попереднє узгодження розподілу обчислювального та комунікаційного ресурсу); вибирає наступне джерело інформації і переходить у відповідну вершину координаційного простору (за наявності такої можливості), виконуючи вибір джерела згідно своєї функціональної ролі $(R_x(a), U_x(a))$ або $(R_y(a), U_y(a))$ [23]; приймає рішення про зміну функціональної ролі згідно методу структурної адаптації $(R_s(a), U_s(a))$ [23].

Зауважимо, що використання запропонованого набору локальних правил (RM, RA) гарантує взаємне виключення при виборі дослідницьких дій (джерел інформації) ВО-процесами. Внаслідок відсутності у запропонованому методі елементів централізованого управління (кожний ВО-процес приймає рішення по переміщенню у координаційному просторі незалежно від інших) та застосування в його роботі асинхронної реплікації координуючих повідомлень, можливі окремі

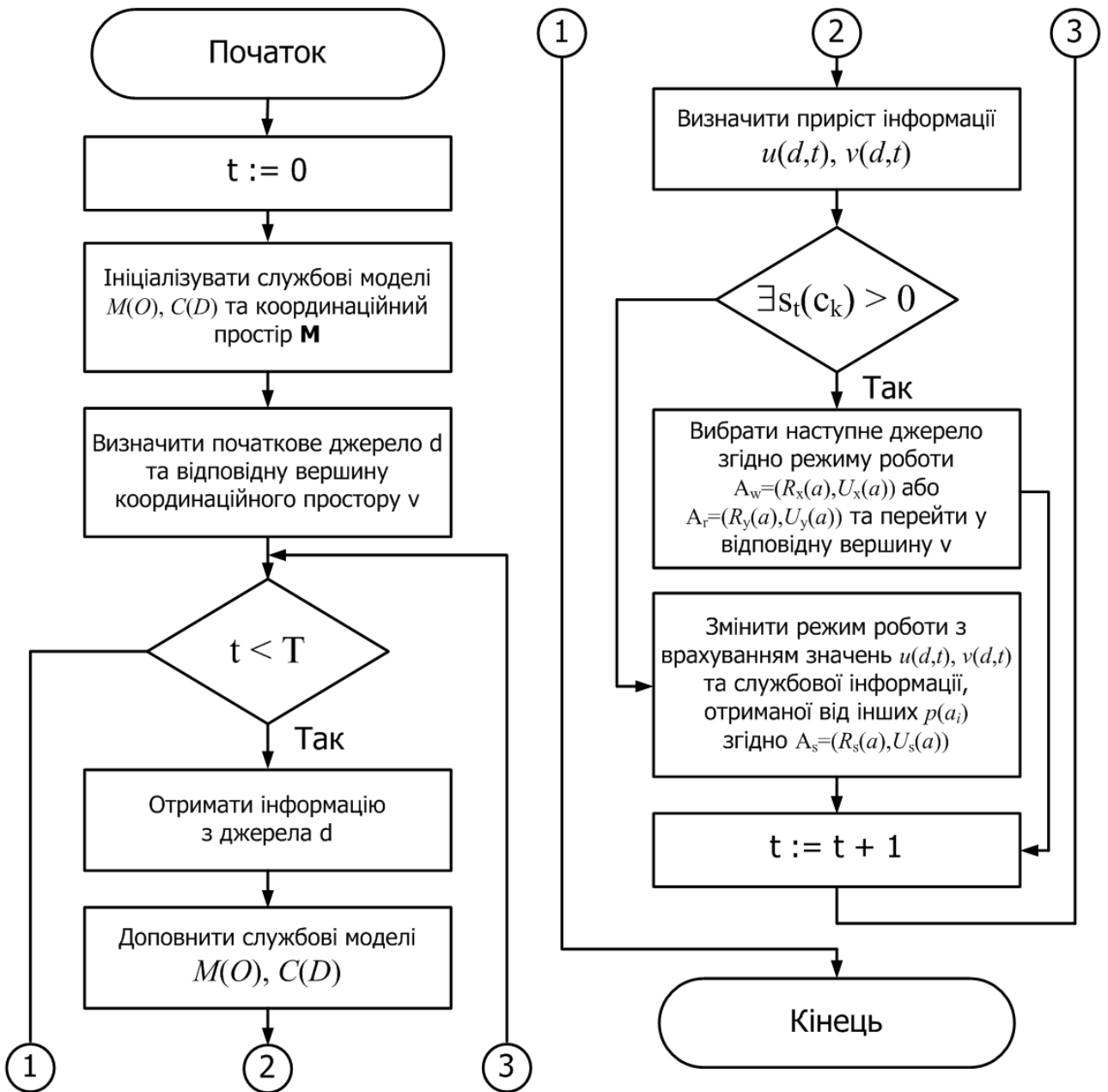


Рис. 2.14. Граф-схема алгоритму управління адаптивним ВО-процесом

відмови ВО-процесів і втрати координуючих повідомлень не можуть суттєво вплинути на роботу механізму координації. Крім цього стійкість запропонованого методу координації до відмов ВО-процесів і втрат координуючих повідомлень додатково забезпечується тим, що репліковані координаційні повідомлення мають обмежений час існування, після якого вони знищуються (згідно **RM2** – правилу «випаровування сліду»). Відтак заблоковані цими повідомленнями ВО-процеси в будь якому випадку будуть розблоковані.

Висновки до розділу 2

1. 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. Розглянуто різні варіанти моделі з точки зору способу оцінки інформативності джерел інформації.

2. 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 за умов невизначеності ніж методи параметричної адаптації. Розроблений метод структурної адаптації ВО-процесів також забезпечує більш високу надійність та живучість підсистем збору інформації АРС. В блоку прийняття рішень 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).

3. Дослідження та моделювання роботи методів адаптації показало перевагу методу структурної адаптації над методами параметричної адаптації ВО-процесів. Зокрема в середньому для різних комбінацій параметрів задачі автономних розподілених досліджень середня кількість зібраної інформації за один крок для МСА на 23.2% більше ніж для МПА. Разом з цим кількість обчислювальних витрат на роботу МСА (в розрахунку на один цикл управління) в середньому більше на 42.3% в порівнянні з МПА.

4. Досліджено надійність роботи МСА за допомогою коефіцієнта збереження ефективності K_Q для різних значень інтенсивності потоку відмов ВО-процесів. 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. Зокрема за

надійністю роботи МСА переважає МПА в середньому на 21.1%. Усереднений показник живучості для МСА більший ніж для МПА на 18.4%.

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.

5. 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.

3. МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ АДАПТИВНИМИ ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИМИ ПРОЦЕСАМИ

3.1. Децентралізоване управління вимірювально-обчислювальними процесами на основі принципу врівноваження

3.1.1. Модель децентралізованого управління ВО-процесами

Для дослідження проблеми узгодження спільних колективних дій з точки зору пошуку ефективної схеми взаємодоповнення дій окремих ВО-процесів за умов відсутності центру управління доцільно розглянути наступну модель децентралізованого управління ВО-процесами на основі принципу врівноваження [68]. Модель має вигляд:

$$M_D = \langle A, G(a,t), X, C, q(t)=f(F_q, \{x_t(a)\}_{N(t)}) \rangle, \quad (3.1)$$

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

$$q(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} (F_q - x_t(a_i)), \quad (3.2)$$

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. 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.

3.1.2. Метод децентралізованого управління ВО-процесами

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. 3.1): 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

$$p_t(d) = \frac{e^{v_t(A,d)/\mu}}{\sum_{D_a} e^{v_t(A,b)/\mu}}, \quad (3.3)$$

де μ – масштабуючий коефіцієнт ($\mu > 0$, $\mu = \text{const}$), $V_t(A,d)$ – уточнена оціночна вага дії d :

$$V_t(A,d) = \sum_{i=1}^{k(t)} w_i V_t(a_i,d), \quad (3.4)$$

де $\{w_i\}_{k(t)}$ – вагові коефіцієнти, такі що

$$\sum_{i=1}^{k(t)} w_i = 1. \quad (3.5)$$

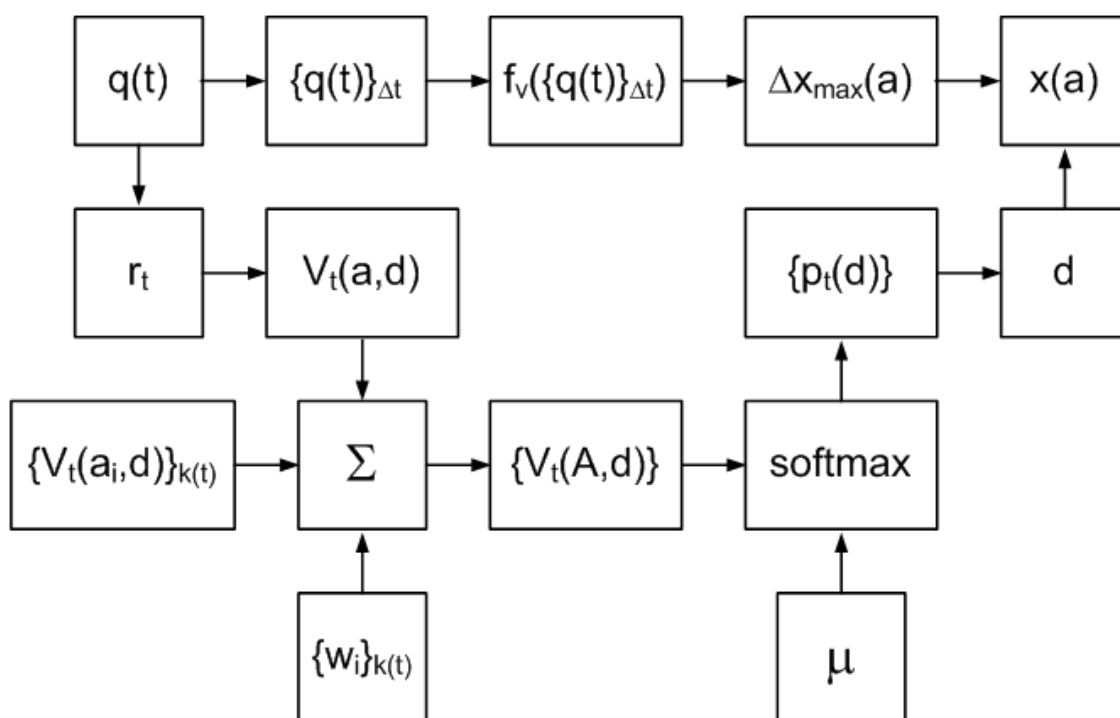


Рис. 3.1. Схема роботи методу децентралізованого управління ВО-процесами

Локальні значення оціночних ваг $V_t(a,d)$ змінюються згідно отриманого виграшу $r(t)=q(t)-q(t-1)$:

$$V_{t+1}(a,d) = V_t(a,d) + \alpha(r_t - V_t(a,d)), \quad (3.6)$$

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

3.1.3. Моделювання роботи методу децентралізованого управління ВО-процесами

Моделювання роботи розробленого методу децентралізованого управління (МДУ-softmax) показало його перевагу над 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. 3.2, рис.3.3). В середньому для різних комбінацій параметрів моделювання ($X=\{500,\dots,10000\}$, $N(t)=\{10,\dots,100\}$, $k=\{2,\dots,10\}$) МДУ-softmax за ефективністю пошуку рішення $w(T)$ переважає АВП на 28.3%.

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. 3.1) та зміни схеми інформаційної взаємодії $G(a,t)$ (у вигляді стаціонарного пуасонівського потоку відмов каналів зв'язку між ВО-процесами з інтенсивністю потоку λ_g на початку роботи) (табл. 3.2). 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. 3.1, табл. 3.2) МДУ-softmax дозволяє організувати автономні розподілені дослідження за умов динамічних змін кількості ВО-процесів та ненадійної обмеженої інформаційної взаємодії між ними.

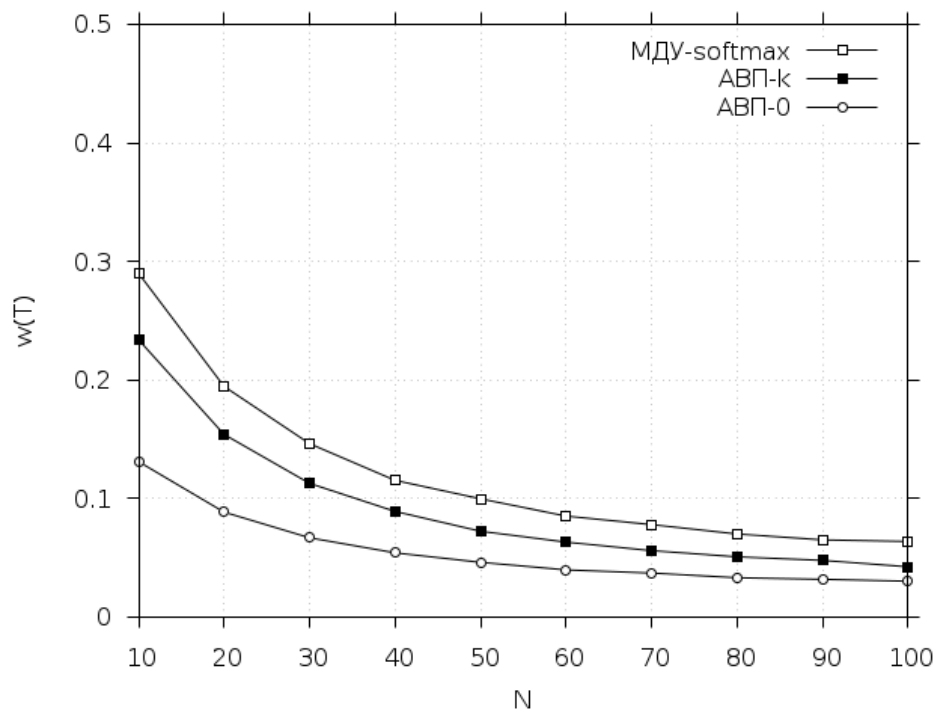


Рис. 3.2. Результати моделювання роботи МДУ,
 $X=1000$, $F_q=500$, $k=2$, $n=10000$

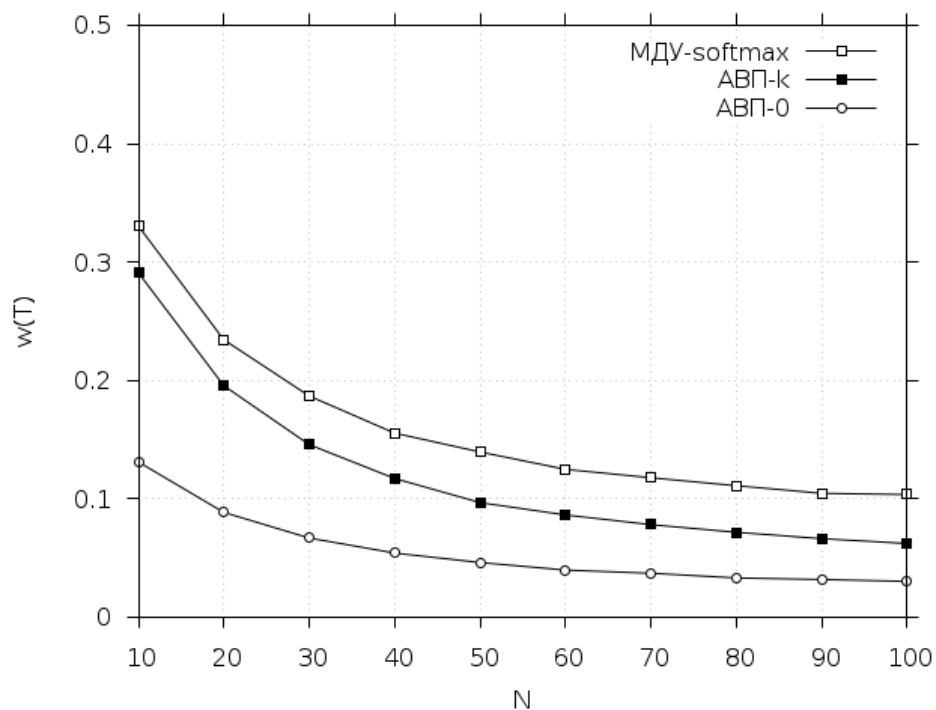


Рис. 3.3. Результати моделювання роботи МДУ,
 $X=1000$, $F_q=500$, $k=10$, $n=10000$

Таблиця 3.1.

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 3.2.

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

Слід зауважити, що в роботах [50,54,68], присвячених даному питанню, для даної моделі децентралізованого управління використовувався термін «алгоритмічна модель» колективної поведінки мобільних вимірювальних агентів, в рамках якої досліджувалася проблема децентралізації управління процесом вимірювання. Така назва моделі лише відображає її взаємозв'язок з алгоритмічною теорією вимірювань [69-71], в якій розглядається узагальнений алгоритм вимірювання, представлений як процес урівноваження невідомої вимірюваної величини за допомогою набору «вагових гир» (модель зважування на терезах) і ставиться питання про синтез оптимального алгоритму вимірювання.

3.2. Інтерполяційна модель колективної поведінки вимірювальних агентів

3.2.1. Інтерполяційна модель колективних вимірювань

В інтерполяційній моделі колективних вимірювань передбачається, що агенти здійснюють контактні точкові вимірювання в заданому середовищі одного або більше параметрів. Модель виглядає наступним чином (рис. 3.4). Є зовнішнє середовище (об'єкт вимірювання), в якому M точок поєднані між собою у єдину просторову структуру X (наприклад, однорідну одновимірну незамкнену решітку з M вузлами). У зовнішньому середовищі реалізована деяка функція $f(x)$, яка задає значення параметрів середовища в кожній його точці. Таким чином в загальному випадку зовнішнє середовище характеризується

1. виміром (1D, 2D, 3D);
2. кількістю точок (M);
3. топологією з'єднань точок;
4. кількістю параметрів;
5. залежностями параметрів від часу та просторової координати (функція середовища $f(x,t)$).

Колектив вимірювальних агентів розміщується у зовнішньому середовищі. Кожний агент в один момент часу займає одну точку середовища. Кожен агент здатний вимірювати параметри середовища в тій точці, де він знаходиться. Кожен агент здатний переміщуватись у просторі за власною ініціативою з заданою наперед рівномірною швидкістю. Колектив вимірювальних агентів характеризується

- типом вимірювального агента (процентний склад у випадку неоднорідного колективу);
- кількістю агентів N ;
- стартовим розміщенням агентів у просторі середовища;
- радіусом видимості засобів зв'язку окремого агента $R(a)$;

- швидкістю окремого агента v (може бути, наприклад, задана як кількість точок середовища, які долає вимірювальний агент за один крок моделювання).

Виміряні значення параметрів середовища агенти передають у центр збору та обробки (далі просто «центр»). В центрі будується функція відтворення $\varphi(x)$ за допомогою деякого методу інтерполяції. При цьому значення, виміряні і передані в центр агентами, виступають в ролі вузлів інтерполяції.

Функцію відтворення можна розглядати як модель реального процесу, який протікає у зовнішньому середовищі. Центр характеризується 1) типом інтерполяції; 2) кількістю точок моделі K ; 3) топологією з'єднань точок моделі. Модель, що розглядається, є моделлю з дискретним часом. Кількість тактів моделювання T задається дослідником перед початком обчислювального експерименту. В першому такті моделювання вимірювальні агенти розміщуються у просторі середовища згідно заданій функції стартового розміщення. Моделювання відбувається наступним чином. В кожному такті генеруються нові значення параметрів для кожної точки середовища (згідно заданій функції середовища). Після цього кожний вимірювальний агент визначає ці значення в тій точці, де він знаходиться і передає їх у центр (а також можливо сусіднім агентам, якщо моделюється самовиявлений колектив). Крім цього агент приймає рішення про переміщення у просторі середовища і реалізує його. В цьому ж такті центр отримує значення параметрів від агентів, будує інформаційний портрет реального процесу, що протікає в середовищі, тобто вираховує значення функції відтворення за допомогою заданого механізму інтерполяції. Після цього вираховується розбіжність значень функції відтворення із значеннями середовища, наприклад, у вигляді середньоквадратичного відхилення. Таким чином, для кожного такту моделювання вираховується похибка моделі реального процесу, яка побудована в центрі на основі показів агентів в даному такті. При цьому використовується принцип «зовнішнього спостерігача», тобто деякої сутності, якій доступні в повному обсязі всі значення параметрів середовища і значення моделі, яка побудована в центрі.

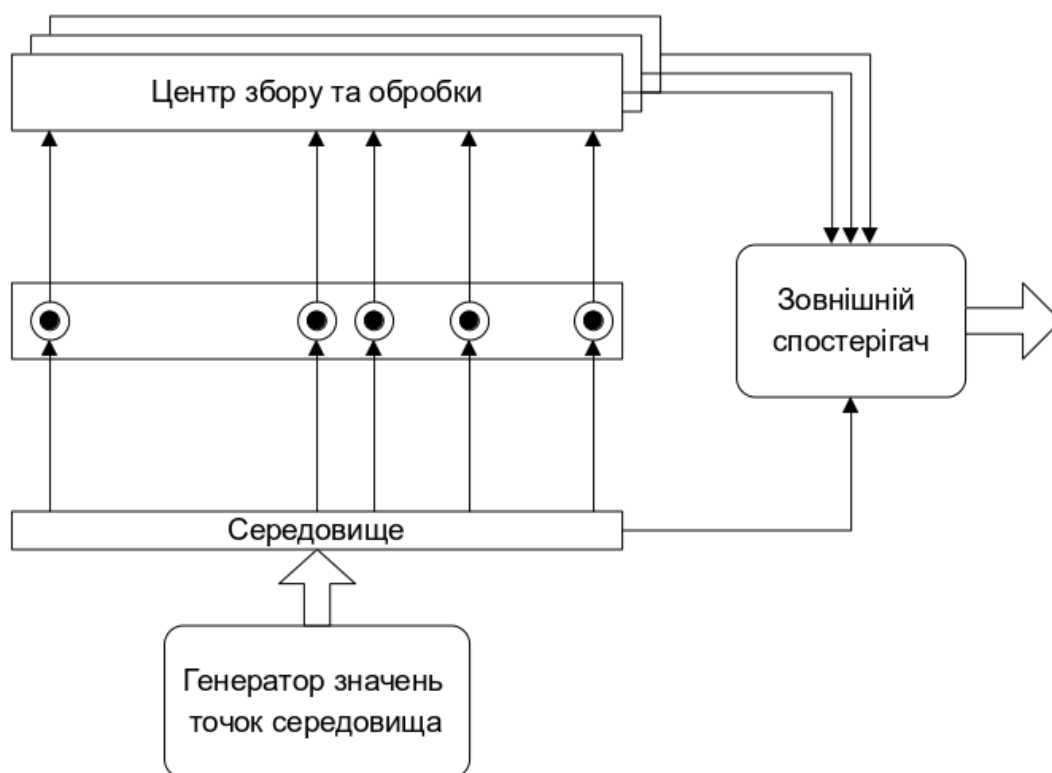


Рис. 3.4. Інтерполяційна модель колективної поведінки вимірювальних агентів

Крім похибки моделі, визначеної з точки зору «зовнішнього спостерігача», вираховується похибка моделі, згідно конкретного методу інтерполяції, що використовується для її побудови (наприклад, значення залишкового члену при поліноміальній інтерполяції). Це те значення похибки, яке є доступним для розрахунків у центрі.

Метою моделювання є, в першу чергу, визначення ефективності досліджуваного алгоритму поведінки вимірювального агента в рамках обраного методу децентралізованого управління. Показником ефективності є зменшення похибки відтворення функції середовища по відношенню до існуючих алгоритмів поведінки вимірювальних систем. В даному випадку не моделюються похибки вимірювань в точці, так само як не моделюються можливі відмови агентів. Природа похибки, що моделюється, є зрозумілою – це похибка інтерполяції. При цьому сам метод інтерполяції в нашому випадку не має великого значення. Впливати на зменшення похибки моделі ми можемо більш вдалим розміщенням вимірювальних агентів (вузлів інтерполяції) у просторі середовища.

Основною перевагою цієї моделі є можливість оцінити внесок кожного вимірювального агента у побудову моделі реального процесу. Цей внесок можна назвати інформаційною корисністю вимірювального агента і інтерпретувати як міру кількості вимірювальної інформації, що здобута цим агентом. Інформаційна корисність визначається як різниця у точності між повною моделлю та моделлю, що побудована без використання значень, що виміряні даним агентом.

Підсумовуючи опис інтерполяційної моделі, представимо її як

$$M_R = \langle A = \{a\}_N, G(a), X, f(x), \varphi(x), q(t) = D[f(x), \varphi(x)] \rangle, \quad (3.7)$$

де $A = \{a\}_N$, – колектив вимірювальних агентів (поведінку яких реалізують відповідні ВО-процеси) у кількості N , розміщені в деякому просторі X , на якому визначена функція $f(x)$, $G(a)$ – схема інформаційної взаємодії вимірювальних агентів. В кожний момент часу t кожний з агентів отримує значення функції $y_i = f(x_i, t)$, після чого по отриманих від агентів значеннях $\{f(x_i, t)\}_N$ шляхом

інтерполяції будується функція $\varphi(x)$ як «зображення» функції $f(x)$. Перед колективом стоїть завдання знайти таке розміщення $\sigma(A)=\{x_i(a)\}_N$ в X , яке б мінімізувало розходження між $f(x)$ і $\varphi(x)$: $q(t)=D[f(x),\varphi(x)]$.

3.2.2. Організація цілеспрямованої колективної поведінки вимірювальних агентів в інтерполяційній моделі

Розглядається колектив вимірювальних агентів $A=\{a\}_N$, які розміщені в деякому середовищі. Перед колективом агентів ставиться задача самостійно досліджувати середовище, передаючи результати досліджень в центр збору і обробки вимірювальної інформації. При цьому допускається локальна інформаційна взаємодія агентів один з одним, яка задається схемою інформаційної взаємодії $G(a)$.

Вимірювальний агент з деяким заданим наперед та незмінним часовим кроком t_s отримує вимірювальну інформацію $y_i=f(x_i,t)$ в тій точці x_i простору, де він знаходиться. Нехай значення t_s буде однаковим для всіх агентів. Випадки, коли значення t_s є різними для різних агентів не розглядаються (хоча така модель є сама по собі дуже цікавою, в першу чергу, з точки зору моделювання біологічних («нечітких») систем). Крім власних значень $f(x_i,t)$ агент може отримувати значення $f(x_j,t)$, $j \neq i$ сусідніх агентів, тобто тих, які потрапили в область видимості його засобів зв'язку згідно $G(a)$.

Ключове обмеження, яке накладається на схему інформаційної взаємодії $G(a)$, полягає в тому, що будь-який агент отримує значення $f(x_j,t)$, $j \neq i$, виміряні сусідніми агентами, з деякою затримкою, яка вимірюється у кількості часових кроків t_s . Ця затримка моделює основну проблему розподілених систем, яка полягає в тому, що в даній точці простору неможливо миттєво отримати значення деякого параметра іншої точки простору. Для цього необхідний час, і на протязі цього часу значення параметра може змінитися. Вплив основної проблеми розподілених систем досліджується шляхом зміни від експерименту до експерименту залежності цієї затримки від відстані до сусіднього агента. При

цьому розглядаються лише ті випадки, коли на протязі одного експерименту ця залежність є незмінною та однаковою для всіх агентів.

Інтерполяційна модель колективної поведінки вимірювальних агентів, що розглядається, є моделлю з дискретним часом. Кількість тактів моделювання T задається дослідником перед початком обчислювального експерименту. В першому такті моделювання вимірювальні агенти розміщуються у просторі середовища згідно заданій функції стартового розміщення (наприклад, випадково). Моделювання відбувається наступним чином. В кожному такті генеруються нові значення параметрів для кожної точки середовища (згідно заданій функції середовища $f(x_j, t)$, $i=1, \dots, M$). Після цього кожний вимірювальний агент визначає ці значення в тій точці, де він знаходиться і передає їх у центр (а також можливо сусіднім агентам, якщо моделюється самовиявлений колектив). Крім цього агент приймає рішення про переміщення у просторі середовища і реалізує його. В цьому ж такті центр отримує значення параметрів від агентів, будує інформаційний портрет (зображення) реального процесу, що протікає в середовищі, тобто вираховує значення функції відтворення за допомогою заданого методу інтерполяції. Після цього вираховується розбіжність значень функції відтворення із значеннями середовища, наприклад, у вигляді середньоквадратичного відхилення. Таким чином, для кожного такту моделювання вираховується похибка моделі реального процесу, яка побудована в центрі на основі показів агентів в даному такті. При цьому використовується принцип «зовнішнього спостерігача», тобто деякої сутності, якій доступні в повному обсязі всі значення параметрів середовища і значення моделі, яка побудована в центрі.

В рамках інтерполяційної моделі колективної поведінки вимірювальних агентів досліджуються шляхи вирішення проблеми розміщення вимірювальних агентів в просторі об'єкту дослідження (як різновид більш загальної проблеми знаходження найкращого способу дослідження об'єкту), а також способи її сумісного вирішення з проблемою управління. В базовому варіанті моделі розглядається обмежена область простору, в якій реалізована деяка функція від

часу та координат (далі функція середовища, яка може представляти собою, наприклад, температурне поле). В цій області розміщується задана кількість мобільних вимірювальних агентів, кожний з яких може вимірювати значення функції в тій точці області, де він знаходиться, і передавати його разом зі своїми координатами в центр збору та обробки. В результаті таких дій всіх вимірювальних агентів в центрі будується зображення функції середовища за допомогою обраного методу інтерполяції (звідси і назва моделі). В даному випадку вимірювальні агенти виступають в ролі вузлів інтерполяції, які можуть самостійно переміщуватись в обмеженій області значень аргументів функції середовища. Внаслідок обмеженої кількості агентів зображення завжди буде відрізнятися від функції середовища, і цю різницю можна оцінити з точки зору зовнішнього спостерігача, використовуючи обраний критерій розбіжності (наприклад, найбільшого відхилення, середньоквадратичний або інтегральний). Природно припустити, що для кожного конкретного випадку (для кожної функції середовища) існують такі розміщення вузлів інтерполяції, які дають глобальний мінімум обраного критерію розбіжності. Таким чином, в рамках інтерполяційної моделі можна досліджувати способи знаходження колективом вимірювальних агентів таких розміщень (статика) або способи організації збіжності переміщень вимірювальних агентів до таких розміщень (динаміка).

Загальна методологія досліджень в рамках інтерполяційної моделі ускладнена тим фактом, що, насправді, досліднику не відома функція середовища $f(x_j, t)$ (в реальних сценаріях розподілених вимірювань зовнішнього спостерігача не існує, а дослідник виконує функції центру збору та обробки інформації). Більше того, в найгіршому випадку дослідник не володіє жодною апріорною інформацією про $f(x_j, t)$ (наприклад, до якого класу відноситься ця функція або якому закону розподілу ймовірностей вона підпорядкована). Підхід до подолання цієї проблеми полягає у навмисному обмеженні класу функцій середовища, для яких розробляються відповідні методи вимірювання [29]. Обмеження вводяться шляхом припущень щодо імовірнісних характеристик функції середовища, її гладкості, диференційованості і т.п. Ці припущення також значно спрощують

процес аналітичного дослідження методу вимірювання, за рахунок використання відомих законів розподілу ймовірностей, узагальнених автокореляційних функцій та інших моделей випадкових процесів. При цьому поза увагою залишається той факт, що функція середовища може змінювати свої імовірнісні характеристики з плином часу. Тобто не розглядається в явному вигляді потреба у самостійному визначенні параметрів функції середовища інструментом вимірювання і зміни його роботи на основі цих досліджень.

В рамках інтерполяційної моделі кожне розміщення N агентів в M дискретах простору задає систему вузлів інтерполяції (базис), на яких будується зображення функції середовища. Серед усіх можливих базисів і відповідно розміщень N агентів в M дискретах простору можна виділити, так звані, екстремальні базиси, на яких обрана оцінка відхилення функції відтворення (зображення) від функції середовища приймає мінімальне значення. Зокрема у випадку чебишевської інтерполяції (рівномірне наближення) мінімізується значення найбільшого відхилення функції відтворення (зображення) від функції середовища. Виходячи з цього можна сформулювати задачу пошуку екстремального базису.

В рамках теорії наближення функцій питання про існування і знаходження найкращих розміщень вузлів інтерполяції в основному досліджено лише для функцій одного аргументу [29]. Вже для функцій двох аргументів в цьому питанні багато незрозумілих моментів [29]. В той же час в даному випадку в якості корисних для вирішення поставленої задачі евристик можуть знайти застосування деякі методи обчислювальної геометрії та методи пошуку екстремумів функції (по аналогії зі способами активного сканування [29]).

3.3. Методи децентралізованого управління поведінкою вимірювальних агентів в інтерполяційній моделі

В рамках моделі M_R розроблено методи децентралізованого управління пошуком розміщення $\sigma(A)$, зокрема метод на основі квантового критерію, метод

рівномірної інтегральної похибки, метод мінімальної сумарної інтегральної похибки та метод рівномірної відносної похибки [59].

Методи управління мобільними вимірювальними агентами можна розділити на дві групи, в залежності від того, чи враховують вони у своїй роботі значення функції середовища $y_i=f(x_i,t)$. До групи методів, що не враховують значення функції середовища $f(x_i,t)$, відносяться метод рівномірного розміщення та метод розміщення за Чебишевим.

Метод рівномірного розміщення передбачає пошук впорядкованого регулярного розміщення вимірювальних агентів в заданому обмеженому просторі об'єкта вимірювання (середовища). При цьому шукається не екстремальний базис, а деякий регулярний базис, в якому, наприклад, відстані між усіма сусідніми агентами однакові. Базовий принцип локального управління (local control rule) для одновимірного обмеженого простору:

$$\Delta x_{i,i-1} = \Delta x_{i,i+1}, \Delta x_{i,i-1} = |x_{i-1} - x_i|, \Delta x_{i,i+1} = |x_{i+1} - x_i| \quad (3.8)$$

де i – номер даного агента (відстані між сусідніми агентами мають бути однаковими). Прикладом застосування даного підходу може бути метод розміщення вимірювальних агентів, запропонований в [59] (метод «поля потенціалів»).

Метод розміщення за Чебишевим передбачає пошук розміщення у вузлах інтерполяції, що є рішеннями многочлену Чебишева першого роду. Таке розміщення гарантує мінімальну можливу похибку інтерполяції у вигляді максимального відхилення функції відновлення від функції середовища за умов неврахування значень останньої. Основна проблема полягає у складності децентралізованого розрахунку відстаней між вимірювальними агентами за умов незалежності локального алгоритму від кількості агентів N . В [39] ця проблема, наприклад, долається за рахунок використання математичного апарату обчислювальної геометрії (зокрема діаграм Вороного).

В якості представників другої групи методів, в яких враховуються значення функції $f(x_i,t)$ можна запропонувати наступні методи [59].

Метод розміщення на основі квантового критерію передбачає пошук розміщення з використанням квантового критерію, запропонованого Темніковим Ф.Е. [28]. Згідно цього критерію функція середовища $f(x_i, t)$ поділяється на рівні інтервали по значенню функції (з врахуванням максимального та мінімального значення $f(x_i, t)$). Після цього визначається яким значенням $\{x_i\}$ відповідають знайдені інтервали по значенню функції. В цих $\{x_i\}$ і розміщуються вимірювальні агенти. Базовий принцип локального управління (local control rule) для одновимірного обмеженого простору:

$$\Delta y_{i,i-1} = \Delta y_{i,i+1}, \Delta y_{i,i-1} = |y_{i-1} - y_i|, \Delta y_{i,i+1} = |y_{i+1} - y_i| \quad (3.9)$$

де $y_i = f(x_i)$, i – номер даного агента («відстані» між значеннями функцій, що вимірюються сусідніми агентами, мають бути однаковими). Слід відзначити, що для випадку інтерполяції поліномом нульового ступеня (ступінчаста інтерполяція вправо) базис $\sigma(A)$ знайдений таким чином буде екстремальним в рамках чебишевської інтерполяції.

Метод розміщення, що гарантує рівномірну інтегральну похибку, передбачає інтерполювання гладкої монотонної функції поліномом нульового ступеня. При цьому шукається базис, для якого інтегральна (абсолютна) оцінка відхилення функції відновлення від функції середовища є рівномірною для усіх «трикутників» відхилення, які утворюються в разі ступінчастої інтерполяції. При цьому передбачається, що площа цих «трикутників» буде однаковою. Базовий принцип локального управління (local control rule) для одновимірного обмеженого простору:

$$\Delta y_{i,i-1} \Delta x_{i,i-1} = \Delta y_{i,i+1} \Delta x_{i,i+1}, \quad (3.10)$$

де $y_i = f(x_i)$, i – номер даного агента.

Метод розміщення з рівномірним поділом "довжини" функції середовища вузлами інтерполяції так само передбачає інтерполювання гладкої монотонної функції поліномом нульового ступеня. При цьому функція середовища «розрізається» вузлами інтерполяції на ділянки однакової «довжини» (в геометричному сенсі). Під довжиною розуміється сума катетів i -го

“трикутника” відхилення. Базовий принцип локального управління (local control rule) для одновимірного обмеженого простору:

$$\Delta y_{i,i-1} + \Delta x_{i,i-1} = \Delta y_{i,i+1} + \Delta x_{i,i+1}, \quad (3.11)$$

де $y_i = f(x_i)$, i – номер даного агента.

Дослідження та моделювання роботи запропонованих методів в рамках інтерполяційної моделі для заданих M , N , одновимірної функції середовища $f(x)$ та методу інтерполяції показало їх перевагу над випадковим розміщенням, рівномірним розміщенням та розміщенням за Чебишевим з точки зору кінцевих значень оцінок розходження $q(t)$ з врахуванням швидкості пошуку відповідного розміщення [59].

Наведені методи можна віднести до групи «релаксаційних» методів організації колективної поведінки, які відрізняються мінімальними вимогами до рівня інформаційної зв'язності вимірювальних агентів. Розвиваючи закладені в них ідеї, можна запропонувати більш складні методи, наприклад, на основі S-перетворення базисів (алгоритм Вале-Пусена) і R-перетворення базисів (R-алгоритм) [71] для випадку Чебишевської інтерполяції (критерій найбільшого відхилення) функції одного аргументу. Слід також зазначити можливість побудови методів управління з використанням евристик, згідно яких, крім всього іншого, допускається функціональна спеціалізація вимірювальних агентів (формування взаємодоповнюючих груп стратегій). При цьому в таких більш складних методах можна реалізувати ідеї самоорганізації інструмента автономних розподілених досліджень.

3.4. Ентропійна модель колективної поведінки вимірювальних агентів

Розглянемо модель децентралізованого управління ВО-процесами на основі статистичної оцінки кількості вимірювальної інформації та принципу зменшення ентропії (ентропійну модель колективної поведінки вимірювальних агентів). В ентропійній моделі колективних вимірювань на відміну від інтерполяційної

моделі точки середовища в першому наближенні статистично незалежні. Схему можливих (допустимих) переміщень агентів у просторі задає граф з'єднань точок середовища. В кожний момент часу точка середовища x може знаходитись в одному з K станів. Кожному стану ставиться у відповідність ймовірність перебування точки в цьому стані. В базовому варіанті моделі – випадкові процеси, що реалізовані в точках середовища, є стаціонарними. Різним точкам середовища ставляться у відповідність різні розподіли ймовірностей по станам. Виходячи з цього, для кожної точки можна визначити відповідне значення ентропії $H_s(x)$. Це значення будемо називати цільовим значенням ентропії точки.

В даній моделі розглядається співвідношення цільової та максимальної ентропії точки $H_{\max}(x)$ (максимальна ентропія відповідає випадку, коли ймовірності появи кожного стану однакові) [50]. Чим більше $\delta(x) = H_{\max}(x) - H_s(x)$, тим більше оцінка кількості інформації, яку отримує вимірювальний агент розміщений в точці x . В ентропійній моделі реалізується наступний сценарій дій. Перед початком роботи в центрі збору інформації будуються інформаційні портрети усіх точок середовища з використанням принципу недостатнього обґрунтування Лапласа. Тобто від самого початку кожній точці ставляться у відповідність однакові ймовірності появи станів. Таким чином, кожна точка перед початком роботи характеризується в центрі збору інформації максимальним значенням ентропії $H_{\max}(x)$. Після стартового розміщення в точках середовища агенти приступають до роботи. В кожному такті кожний агент визначає стан точки x , в якій він знаходиться і передає цю інформацію в центр збору інформації. Після цього агент приймає рішення відносно того, залишатися йому в цій точці, чи переміститись у іншу точку, і реалізує прийняте рішення. Метою колективу вимірювальних агентів є збір усієї «закладеної» в середовище інформації $\{\delta(x)\}_M$ за можливо меншу кількість часових кроків (збільшення кількості отриманої інформації) та можливо меншу кількість переміщень між точками (зменшення витрат). Задача має зміст лише в тому випадку, коли кількість агентів менше кількості точок середовища: $N < M$. Додатковим обмеженням є те, що в один момент часу в одній точці середовища може знаходитись один агент.

Оскільки в центрі збору інформації у всіх точок початково встановлена максимально ентропія, то перебування агента в точці, цільова ентропія якої дорівнює максимальній $H_s(x)=H_{\max}(x)$, не дає ніякої додаткової інформації. Отже, загальна цільова функція колективу вимагає від агентів бувати частіше в тих точках, де розходження цільової та максимальної ентропії $\delta(x)$ є найбільшим [50].

Одною з переваг даної моделі є те, що вона дає можливість оцінити кількість інформації, яку отримує кожний агент на кожному часовому кроці, шляхом визначення різниці значень ентропії інформаційного портрету точки до і після того, як отримано повідомлення про її біжучий стан від агента, який в ній знаходиться [50].

В рамках ентропійної моделі колективної поведінки вимірювальних агентів досліджується проблема пошуку найкращого розміщення N агентів на множині M випадкових середовищ (точок середовища), а також взаємозв'язок процесу самоорганізації колективу вимірювальних агентів і кількості інформації про оточуюче середовище, яку він збирає. Множину випадкових середовищ можна розглядати як набір повністю або частково незалежних джерел подій з деякого обмеженого алфавіту. В найбільш простому випадку всі джерела подій є стаціонарними. Відтак процес збору інформації колективом вимірювальних агентів моделюється процесом поступового накопичення статистичної інформації у вигляді ймовірностей реалізації різних подій у різних джерелах. Згідно логіці ентропійної моделі агенту не вигідно знаходитись в джерелі подій, справжня ентропія якого максимальна, так як цей факт вже відображено в центрі збору, і нової інформації в загальний інформаційний портрет середовища в даному випадку агент не привносить. Відповідно чим ближче цільова ентропія джерела $H_s(x)$ до максимальної ентропії $H_{\max}(x)$, тим менше часу має проводити в ньому окремий агент. Відтак в ентропійній моделі реалізовано два типи невизначеності: 1) невизначеність щодо характеристик середовища (цільові ентропії джерел подій $\{H_s(x)\}_M$ не відомі агентам заздалегідь) та 2) невизначеність щодо дій інших агентів по вибору джерел (повна або часткова).

Висновки до розділу 3

1. 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).

2. Розроблено метод децентралізованого управління адаптивними ВО-процесами в АРС на основі принципу врівноваження та навчання з підкріпленням за методом нормованої експоненційної функції з уточненням оціночної ваги дії значеннями оціночних ваг отриманими від інших агентів, який на відміну від відомих дозволяє організувати автономні розподілені дослідження за умов динамічних змін кількості ВО-процесів та ненадійної обмеженої інформаційної взаємодії між ними.

3. 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 (в середньому на 28.3%).

4. За допомогою коефіцієнту збереження ефективності K_T , 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) та зміни схеми інформаційної взаємодії (у вигляді стаціонарного пуасонівського потоку відмов каналів зв'язку між ВО-процесами з інтенсивністю потоку λ_g на початку роботи). Згідно з отриманими результатами МДУ-softmax дозволяє організувати автономні розподілені дослідження за умов динамічних змін кількості ВО-процесів та ненадійної обмеженої інформаційної взаємодії між ВО-процесами.

5. 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. В рамках інтерполяційної моделі розроблено методи децентралізованого управління пошуком розміщення вимірювальних агентів, зокрема метод на основі квантового критерію, метод рівномірної інтегральної похибки, метод мінімальної сумарної інтегральної похибки та метод рівномірної відносної похибки. 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.

4. РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧ КОЛЕКТИВНОЇ ПОВЕДІНКИ МОБІЛЬНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ АГЕНТІВ

4.1. Функціональне узгодження методів організації адаптивних ВО-процесів та методів просторової самоорганізації мобільних вимірювальних агентів

На даний час існує велике різноманіття мобільних робототехнічних платформ, які використовуються в якості підсистем переміщення мобільних вимірювальних агентів (МВА). На їх основі будуються системи розподіленої робототехніки або колективи мобільних робототехнічних агентів, на які покладаються функції збору інформації. МВА у складі цих колективів вирішують поставлені перед ними задачі просторової самоорганізації (впорядковане розміщення та узгоджене переміщення агентів колективу за умов децентралізованого управління) шляхом виконання відповідних алгоритмів колективної поведінки [72-75]. Алгоритми просторової самоорганізації працюють на основі вхідних даних, які вони отримують від відповідних підсистем мобільної робототехнічної платформи. Наприклад, вхідними даними можуть бути: місцезнаходження агента, розташування інших агентів колективу, певні дані про середовище і т.д.; вихідними даними можуть бути: координати точки простору, до якої повинен прямувати агент, напрямок руху, швидкість руху і т.п. При цьому вхідні та вихідні дані алгоритмів просторової самоорганізації та принципи їх роботи сильно залежать від типу мобільної робототехнічної платформи. Ця залежність різко ускладнює дослідження і розроблення методів організації адаптивних ВО-процесів, які реалізують поведінку МВА, оскільки для кожного конкретного типу мобільної робототехнічної платформи і відповідного типу середовища (наземне, повітряне, водне, тощо) потрібно розробляти і реалізовувати свою специфічну «версію» методів організації адаптивних ВО-процесів. Відтак постає проблема пошуку та розробки таких способів функціонального узгодження методів організації адаптивних ВО-процесів та методів просторової самоорганізації МВА, які б дозволяли уніфікувати взаємодію

адаптивних ВО-процесів та процесів управління переміщенням МВА і зводили функціональну залежність між ними до мінімуму.

Для вирішення цієї проблеми удосконалено спосіб функціонального узгодження методів організації ВО-процесів та методів просторової самоорганізації мобільних вимірювальних агентів шляхом паралельного виконання відповідного ВО-процесу $p(a)$ та процесу управління переміщенням МВА $p(s)$, який реалізує методи просторової самоорганізації. 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. 4.1): $\{p(a,s) \rightarrow [p(a),p(s)]; C(a,s) \rightarrow C(a), C(s); W(a,s) \rightarrow W(a), W(s)\}$, 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. 4.1), 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 $\Lambda(a,s)$:

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

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. 4.1). 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% (середнє арифметичне експериментально отриманих оцінок відносного прискорення обчислень для всіх комбінацій значень $(n=\{2, \dots, 5\}, k=\{2, \dots, 10\}, p=\{2, 4, 6, 8\}, x_a=\{6, 8, 10, 12\}, x_s=\{6, 8, 10, 12\})$).

Таблиця 4.1.

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

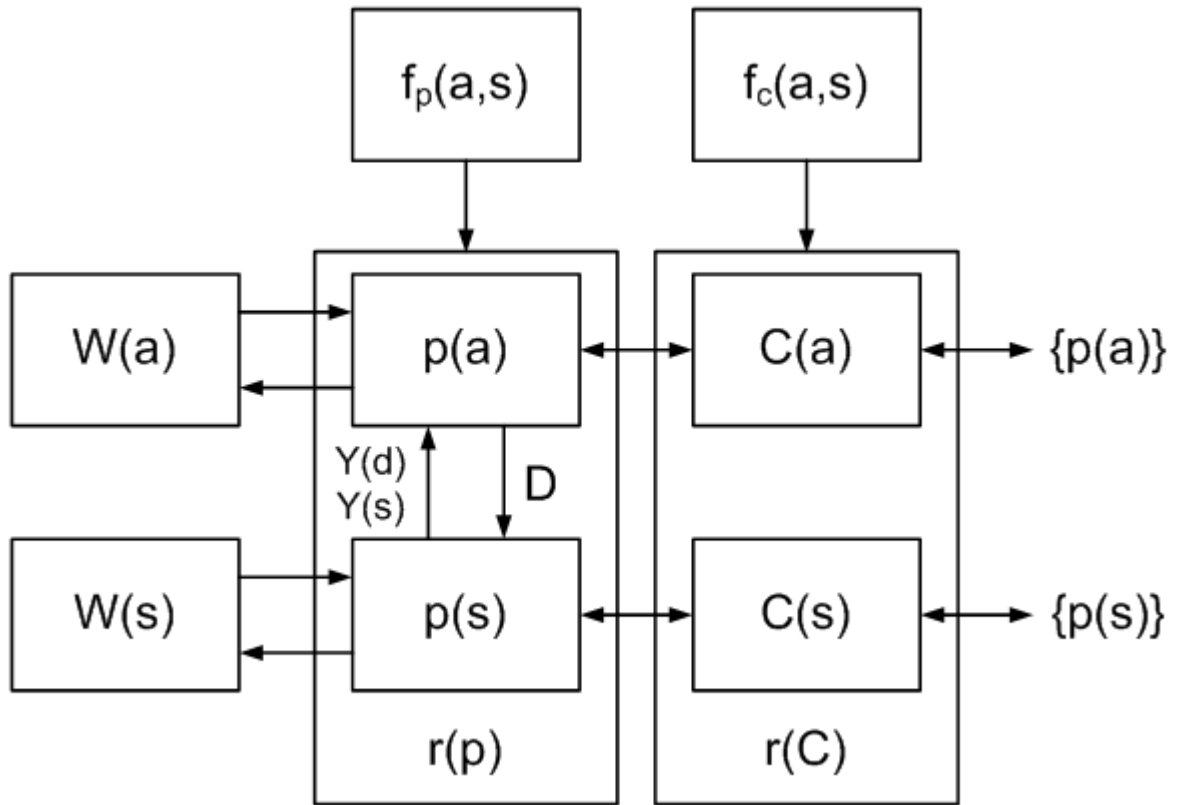


Рис. 4.1. Схема функціонального узгодження методів організації ВО-процесів та методів просторової самоорганізації МВА

4.2. Розв'язок задачі активних сукупних вимірювань колективом мобільних вимірювальних агентів

Розглянемо проблему організації адаптивних ВО-процесів в задачі активних сукупних вимірювань колективом мобільних вимірювальних агентів на основі багатофункціонального методу визначення параметрів водного середовища [76]. У випадку сукупних вимірювань значення декількох величин знаходять шляхом розв'язку системи рівнянь, отриманих прямим вимірюванням різних комбінацій цих величин [25]. В даному випадку прямі вимірювання виконують три мобільні вимірювальні агенти $\{A_1, A_2, A_3\}$, після того, як вони розташовуються в просторі водного середовища у вигляді правильного трикутника (кожний з агентів визначає значення температури водного середовища в тій точці, де він знаходиться). Додатково в центрі трикутника розташовується четвертий мобільний вимірювальний агент A_4 , який виконує роль точкового джерела програмованих теплових збурень. Таке розташування чотирьох мобільних вимірювальних агентів є результатом процесу їх просторової самоорганізації, який реалізується процесами управління переміщенням МВА $\{p(s, A_1), p(s, A_2), p(s, A_3), p(s, A_4)\}$, що підпорядковані відповідним адаптивним ВО-процесам $\{p(a_1), p(a_2), p(a_3), p(a_4)\}$. В ході активних сукупних вимірювань за наведеною нижче схемою ВО-процес $p(a_i)$ віддає наступні команди процесу управління переміщенням $p(s, A_i)$: d_1 – забезпечити розташування у вершині (A_1, A_2, A_3) чи центрі (A_4) правильного трикутника, d_2 – забезпечити перерозташування в такий спосіб, щоб змінити величину сторони трикутника на задану величину.

4.2.1. Схема роботи та можливості багатофункціонального методу визначення параметрів водного середовища

Розглянемо схему роботи багатофункціонального методу визначення параметрів водного середовища (БФМ) [76], яка містить в своєму складі три ідентичні давачі температури ($ДТ_1, ДТ_2, ДТ_3$), які розташовані в одній площині по кутах правильного трикутника, і точкове джерело програмованих теплових

збурень, або просто точкове джерело температури (ТДТ), яке розташоване в геометричному центрі трикутника (рис. 4.2). В схему роботи БФМ (рис. 4.3), окрім давачів температури і ТДТ, входять також перетворювачі вимірювального сигналу (ПС₁, ПС₂, ПС₃), спеціалізований обчислювальний пристрій та джерело живлення. Параметри водного середовища, які можна вимірювати за допомогою БФМ наведені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2.

Параметри водного середовища, що вимірюються за допомогою БФМ

№°	Параметри водного середовища
1	температура в точці
2	коефіцієнт температуропровідності (на основі якого робиться попередній висновок про концентрацію зважених частинок)
3	напрямок природних теплових потоків
4	величина природних теплових потоків
5	характер мікроструктурних переміщень
6	напрямок течії
7	швидкість течії

Реалізація БФМ на основі колективу МВА передбачає розміщення здавачів температури (ДТ₁, ДТ₂, ДТ₃) окремо один від одного у складі сенсорних підсистем відповідних мобільних вимірювальних агентів {A₁, A₂, A₃}, а точкового джерела програмованих теплових збурень – у складі виконавчої підсистеми ще одного мобільного вимірювального агента A₄. Відтак необхідна конфігурація елементів схеми вимірювання у просторі (рис. 4.2) буде утворюватись як результат колективних дій мобільних вимірювальних агентів та реалізації відповідного процесу просторової самоорганізації [72-75].

Для отримання прийнятних результатів вимірювань в якості давачів температури доцільно використовувати п'єзокварцові давачі температури, як найбільш прецизійні і такі, що дають можливість підвищувати їх метрологічні характеристики в подальшому [76]. Точкове джерело програмованих

температурних збурень призначено для короткочасного випромінювання потужного імпульсу температури в малому об'ємі. В якості нього можна, наприклад, використати газорозрядну лампу-спалах або інші імпульсні джерела теплоти.

Для отримання вертикальних складових переміщень води і течії можна розташувати давачі ($ДТ_1$, $ДТ_2$, $ДТ_3$) та ТДТ у вертикальній площині. Для одночасного визначення горизонтальної і вертикальної складових замість двовимірної схеми роботи можна використати тривимірний варіант (рис. 4.4). В цьому випадку ускладнюється математичний апарат для визначення необхідних параметрів, внаслідок чого зростають об'єми обчислень.

До переваг запропонованого БФМ можна віднести:

1. багатфункціональність;
2. простоту схеми роботи;
3. надійність функціонування;
4. можливість забезпечення достатньої точності вимірювання;
5. мінімальні зміни (спотворення) фізичного стану досліджуваного водного середовища.

4.2.2. Принципи роботи БФМ

При вимірюванні перерахованих в табл. 4.2. параметрів водного середовища вирішуються три різні задачі, які відповідають наступним режимам роботи:

- Вимірювання температури в точці, параметр 1 (здійснюється безпосередньо за допомогою відповідного давача температури). Одночасно отримуються значення температури в трьох точках водного середовища ($ДТ_1$, $ДТ_2$, $ДТ_3$).
- Вимірювання природних теплових потоків, параметри 2, 3, 4 (процес визначення представляє собою вирішення задачі стаціонарної тепловіддачі в напівнескінченну область [77-80]). При вимірюванні використовуються давачі температури, ТДТ не використовується.

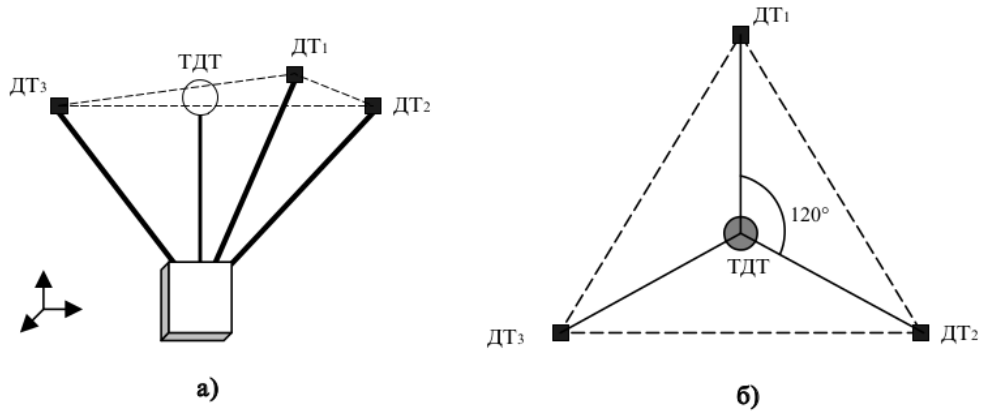


Рис. 4.2. Схема роботи багатofункціонального методу визначення параметрів водного середовища
а) загальний вигляд, б) вигляд зверху

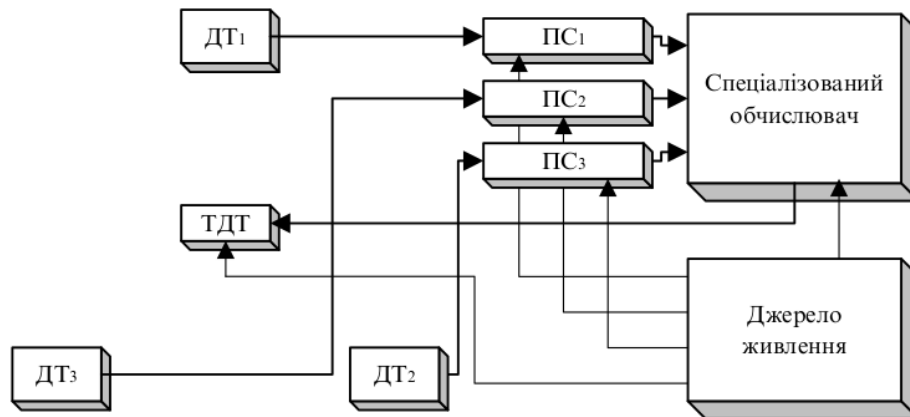


Рис. 4.3. Структурна схема роботи БФМ

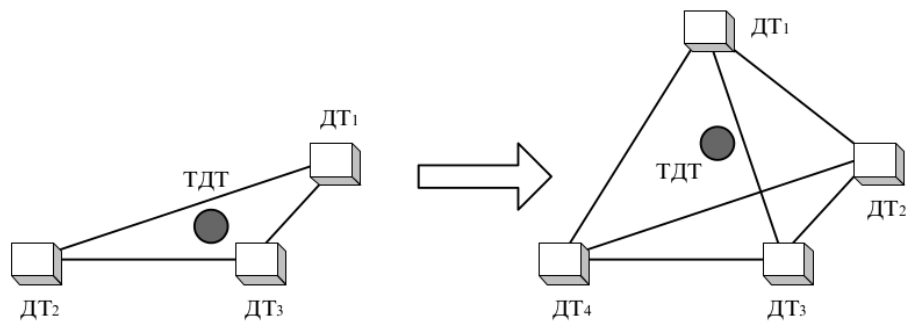


Рис. 4.4. Перехід від двовимірного варіанту схеми роботи до тривимірного

- Вимірювання переміщень водного середовища, параметри 5, 6, 7 (процес визначення представляє собою вирішення задачі термозондування в умовах програмованого нагріву [77,78,81,82]). При вимірюванні використовуються датчики температури та ТДТ.

З метою підвищити точність вимірювань, результати, отримані в другому режимі, враховуються при вимірюванні переміщень водного середовища (третій режим вимірювання).

4.2.3. Вимірювання природних теплових потоків

Напрямок і величина природних теплових потоків визначаються без участі ТДТ. Внаслідок наявності природного теплового потоку датчики ДТ₁, ДТ₂, ДТ₃ будуть показувати різні значення температури (рис. 4.5). В цьому випадку складається система двох рівнянь з трьома невідомими a , L_1 , L_2

$$\begin{cases} T_2 = f(T_1, a, L_1) \\ T_3 = f(T_2, a, L_2) \end{cases} \quad (4.1)$$

Розглянемо трикутники ΔAOP , ΔKBO , ΔCDO (рис. 4.4,а). Виходячи з того, що ці трикутники є прямокутними запишемо співвідношення для їх кутів

$$\begin{aligned} \beta + \alpha &= 120^\circ; \rightarrow \beta = 120^\circ - \alpha; \\ \gamma + \beta &= 90^\circ; \rightarrow \gamma = 90^\circ - 120^\circ + \alpha = \alpha - 30^\circ; \\ \varphi + \alpha &= 60^\circ; \rightarrow \varphi = 60^\circ - \alpha. \end{aligned}$$

Використовуючи ці співвідношення, виразимо відстані L_1 і L_2 через відомий радіус R та невідомий кут α

$$\begin{aligned} L_1 &= OP - OK \rightarrow L_1 = R \cdot \cos(\alpha) - R \cdot \sin(\alpha - 30^\circ); \\ L_2 &= OK + OD \rightarrow L_2 = R \cdot \sin(\alpha - 30^\circ) + R \cdot \cos(60^\circ - \alpha). \end{aligned}$$

Для випадку, зображеного на рис. 4.5,б співвідношення для кутів мають наступний вигляд

$$\begin{aligned} \beta - \alpha &= 60^\circ; \rightarrow \beta = 60^\circ + \alpha; \\ \gamma + \beta &= 90^\circ; \rightarrow \gamma = 90^\circ - 60^\circ - \alpha = 30^\circ - \alpha; \\ \varphi + \alpha &= 60^\circ; \rightarrow \varphi = 60^\circ - \alpha. \end{aligned}$$

Звідси

$$L_1 = OP + OK \rightarrow L_1 = R \cdot \cos(\alpha) + R \cdot \sin(30^\circ - \alpha);$$

$$L_2 = OD - OK \rightarrow L_2 = -R \cdot \sin(30^\circ - \alpha) + R \cdot \cos(60^\circ - \alpha).$$

Так як $-\sin(\alpha - 30^\circ) = \sin(30^\circ - \alpha)$, то для обох випадків (рис. 4.5, а, б) отримуємо однаковий вираз для L_1 і L_2 . Таким чином, одержуємо систему двох рівнянь з двома невідомими a і α

$$\begin{cases} T_2 = f(T_1, a, \alpha) \\ T_3 = f(T_2, a, \alpha) \end{cases} \quad (4.2)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності.

Залежність f знаходиться з задачі стаціонарної тепловіддачі в напівнескінченну область [77-82]. Для цього розглянемо диференційне рівняння стаціонарної теплопровідності (при сталому коефіцієнті теплопровідності і відсутності внутрішніх джерел температури)

$$\nabla^2 T = 0$$

або

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (4.3)$$

В цьому випадку залежність f прийме вигляд

$$T_1 = T_0 \cdot e^{-m(a) \cdot L}, \quad (4.4)$$

де L - відстань між точками з температурами T_1 і T_0 ;

$m(a)$ – сталий коефіцієнт, пропорційний коефіцієнту температуропровідності a .

Таким чином, система рівнянь приводиться до наступного вигляду

$$\begin{cases} T_2 = T_1 \cdot e^{-m(a) \cdot L_1} \\ T_3 = T_2 \cdot e^{-m(a) \cdot L_2} \end{cases} \quad (4.5)$$

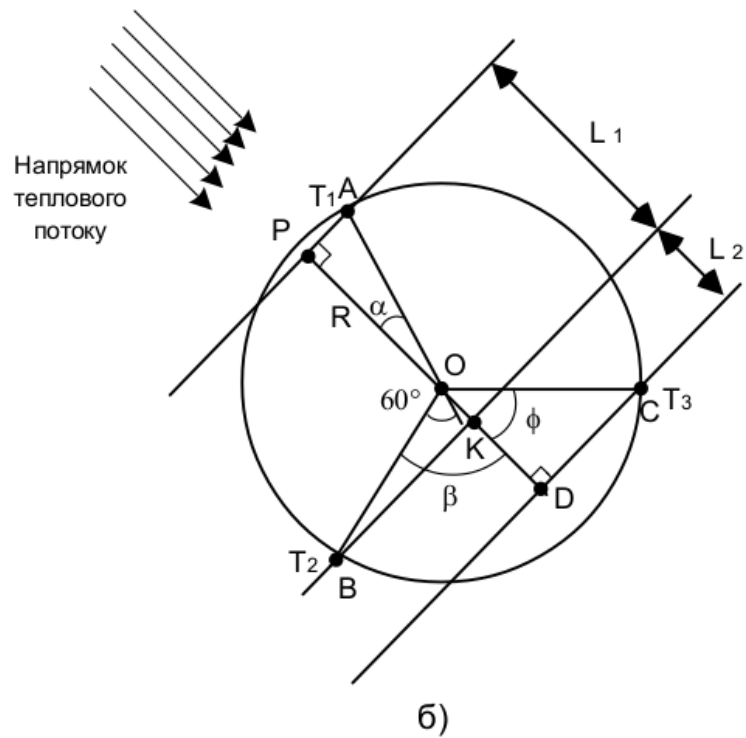
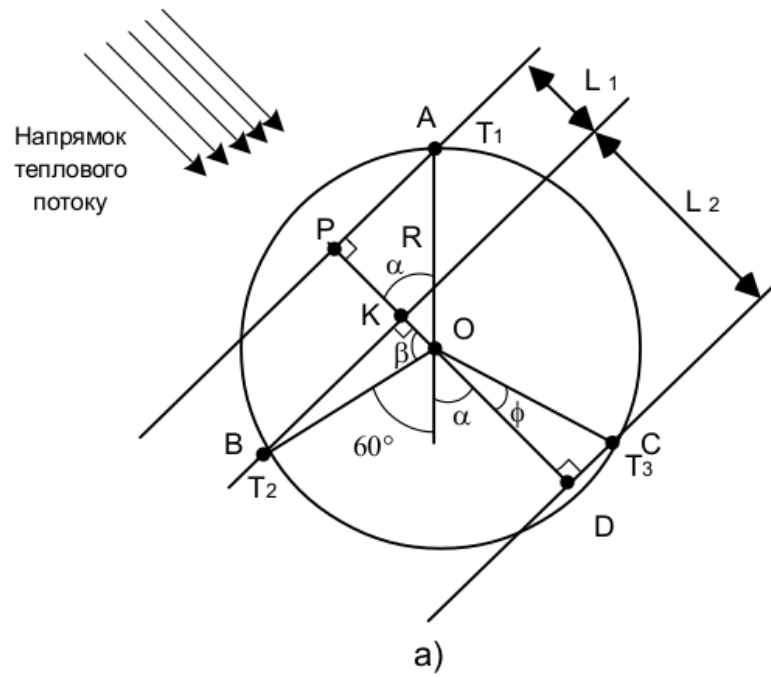


Рис. 4.5. Схема вимірювального процесу при визначенні параметрів природних теплових потоків: а) перший можливий випадок, б) другий можливий випадок

В результаті розв'язання системи рівнянь (4.5) визначаються напрямки природного теплового потоку (виходячі із значення кута α і показів навігаційних підсистем мобільних вимірювальних агентів), а також коефіцієнт температуропровідності \mathbf{a} .

4.2.4. Вимірювання переміщень водного середовища

Вимірювання переміщень (течій) водного середовища містить наступні етапи:

1. ТДТ випромінює потужний імпульс температури.
2. Через відомий час t вимірюються значення температури датчиками ДТ₁, ДТ₂, ДТ₃.
3. На основі отриманих значень температури та відомого часу t обчислюються параметри 5, 6, 7 (табл. 4.2).

При цьому, змінюючи тривалість випромінювання і відомий час t можна як підвищувати точність вимірювань, так і налагоджувати схему роботи БФМ на вимірювання конкретного параметру водного середовища.

Алгоритм обчислень, що здійснюються на третьому етапі базується на математичному апараті, який описує перший та другий етапи наведеного вище процесу вимірювання. Чим потужніше, цей математичний апарат, тим більш точні результати можуть бути отримані. В даному випадку математичний апарат заснований на закономірностях, що досліджуються теорією теплообміну в рідинах. В даній роботі, з метою показати принципову можливість отримання необхідних параметрів, використовується простий підхід для випадку, коли тривалість випромінювання потужного імпульсу температури не приймається до уваги, як дуже мала величина.

Згідно цього підходу процес вимірювання описується наступним чином. За відомий час t , що пройшов після випромінювання імпульсу температури, внаслідок явища теплообміну нагрівається деякий об'єм оточуючого водного середовища, який назовемо тепловою "хмарою". Ця тепла "хмара" продовжуючи розширяться відноситься течією в деякому напрямку. З врахуванням зміщення

теплової “хмари” та її розширення, датчі температури DT_1 , DT_2 , DT_3 (рис. 4.6) покажуть різні значення температури.

Прийmemo наступні позначення: $AO_2=r_1$; $BO_2=r_2$; $CO_2=r_3$; $AO_1=CO_1=BO_1=R$; $O_1O_2=x$. Тоді вимірювальний процес можна описати наступною системою рівнянь,

$$\begin{cases} T_1 = f(T_0, t, a, r_1) \\ T_2 = f(T_0, t, a, r_2) \\ T_3 = f(T_0, t, a, r_3) \end{cases}, \quad (4.6)$$

де t – час, що пройшов між випромінюванням потужного імпульсу температури і вимірюванням значень температури в точках А, В, С (рис.4.6);

T_0 – початкове значення температури, до якого нагрілась точка O_2 ;

a – коефіцієнт теплопровідності, який в свою чергу дорівнює

$$a = \frac{k}{c \times \rho}, \quad (4.7)$$

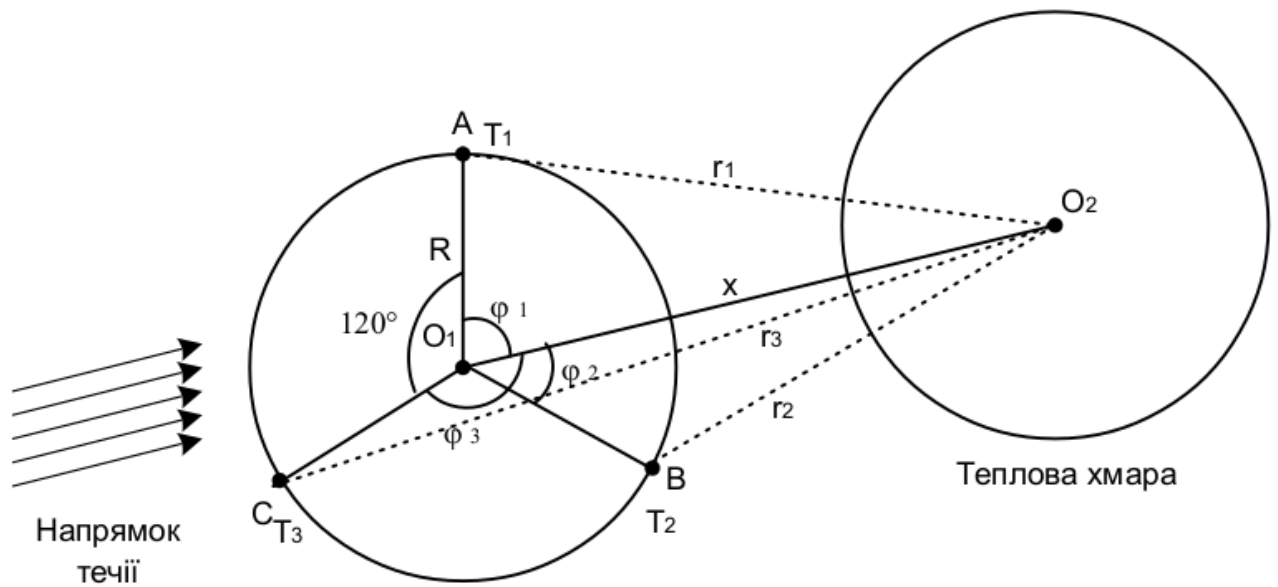
де k – коефіцієнт теплопровідності; c – питома теплоємність; ρ – густина води.

Залежність f описує розповсюдження тепла в умовно нескінченному об'ємі води від точки нагрітої до температури T_0 . Таким чином, залежність f треба шукати з рівняння теплопровідності для випадку нестационарного теплообміну (рівняння нестационарного температурного поля), яке є диференціальним рівнянням параболічного типу і має наступний вигляд [77,79]

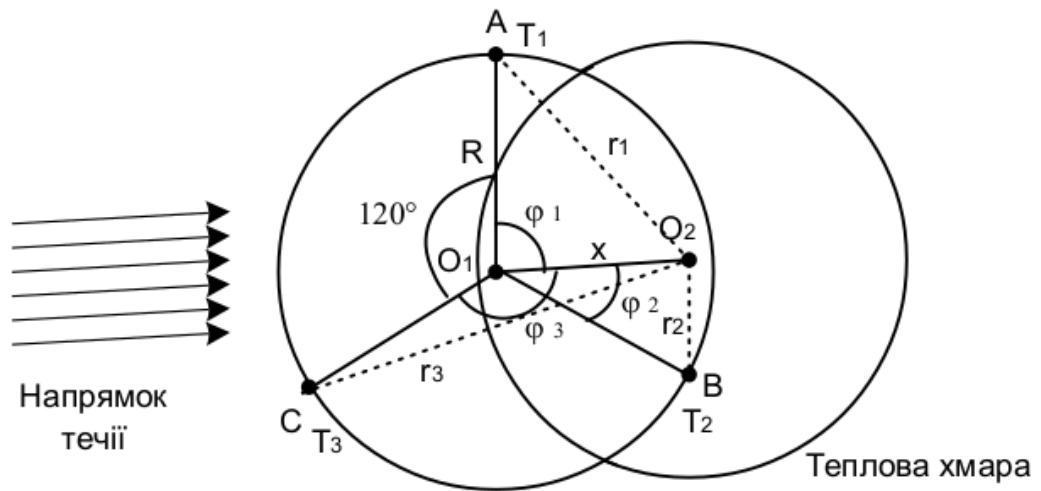
$$a \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (4.8)$$

У випадку нескінченного однорідного середовища з постійною температурою і при умові, що областю, в якій задана початкова температура $T(x,y,z)$, є весь простір, рішення цього рівняння може бути записано в замкнутій формі [77,81]

$$T(x, y, z, t) = \frac{1}{(2 \cdot \sqrt{\pi \cdot t \cdot a})^3} \int \int \int_{-\infty}^{+\infty} T_0(x', y', z') e^{-\frac{\Omega^2}{4 \cdot a \cdot t}} dx' dy' dz', \quad (4.9)$$



а)



б)

Рис. 4.6. Схема вимірювального процесу при визначенні параметрів переміщень водного середовища: а) швидке переміщення
б) повільне переміщення

де

$$\Omega^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2 . \quad (4.10)$$

Для випадку точкового джерела початкової температури T_0 отримане рішення приводиться до вигляду [81]

$$T(x, y, z, t) = \frac{T_0 \cdot \Delta V}{(2 \cdot \sqrt{\pi \cdot t \cdot a})^3} \cdot e^{-\frac{\Omega^2}{4 \cdot a \cdot t}} , \quad (4.11)$$

де

$$\Omega^2 = x^2 + y^2 + z^2 , \quad (4.12)$$

де x, y, z – лінійні координати,

t – час, що пройшов після випромінювання імпульсу температури,

ΔV – об'єм точкового джерела нагріву (відносно мала величина),

T, T_0 – відносні значення температури :

$$T_0 = T_n - T_s, \quad T = T_t - T_s, \quad \text{де}$$

T_n – початкова температура в точці нагріву,

T_s – температура оточуючого середовища,

T_t – температура в момент часу t .

Таким чином, система рівнянь для даного вимірювального процесу прийме вигляд

$$\begin{cases} T_1 = \frac{T_0 \cdot \Delta V}{(2 \cdot \sqrt{\pi \cdot t \cdot a})^3} \cdot e^{-\frac{r_1^2}{4 \cdot a \cdot t}} \\ T_2 = \frac{T_0 \cdot \Delta V}{(2 \cdot \sqrt{\pi \cdot t \cdot a})^3} \cdot e^{-\frac{r_2^2}{4 \cdot a \cdot t}} \\ T_3 = \frac{T_0 \cdot \Delta V}{(2 \cdot \sqrt{\pi \cdot t \cdot a})^3} \cdot e^{-\frac{r_3^2}{4 \cdot a \cdot t}} \end{cases} . \quad (4.13)$$

Розглядаючи трикутники ΔAO_2O_1 , ΔCO_2O_1 , ΔBO_2O_1 і використовуючи теорему косинусів, запишемо

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{R^2 + x^2 - R \cdot x \cdot \cos(\varphi_1)} \\ r_2 &= \sqrt{R^2 + x^2 - R \cdot x \cdot \cos(\varphi_2)} . \\ r_3 &= \sqrt{R^2 + x^2 - R \cdot x \cdot \cos(\varphi_3)} . \end{aligned} \quad (4.14)$$

Кути $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ можуть бути виражені через один кут φ_1 наступним чином $\varphi_1 + \varphi_2 = 2\pi/3$ і $\varphi_3 = \varphi_2 + 2\pi/3$, звідси

$$\varphi_1 = \varphi_1;$$

$$\varphi_2 = 2\pi/3 - \varphi_1;$$

$$\varphi_3 = 2\pi/3 + 2\pi/3 - \varphi_1 = 4\pi/3 - \varphi_1.$$

Таким чином, отримаємо систему з трьох рівнянь з трьома невідомими

$$\begin{cases} T_1 = \frac{T_0 \cdot \Delta V}{(2 \cdot \sqrt{\pi \cdot t \cdot a})^3} \cdot e^{\frac{-R^2 - x^2 + R \cdot x \cdot \cos(\varphi_1)}{4 \cdot a \cdot t}} \\ T_2 = \frac{T_0 \cdot \Delta V}{(2 \cdot \sqrt{\pi \cdot t \cdot a})^3} \cdot e^{\frac{-R^2 - x^2 + R \cdot x \cdot \cos(\frac{2\pi}{3} - \varphi_1)}{4 \cdot a \cdot t}} \\ T_3 = \frac{T_0 \cdot \Delta V}{(2 \cdot \sqrt{\pi \cdot t \cdot a})^3} \cdot e^{\frac{-R^2 - x^2 + R \cdot x \cdot \cos(\frac{4\pi}{3} - \varphi_1)}{4 \cdot a \cdot t}} \end{cases} \quad (4.15)$$

Вирішивши систему рівнянь (4.15), знаходимо a, x, φ_1 . Швидкість течії визначається згідно формули

$$v = \frac{x}{t}. \quad (4.16)$$

Напрямок течії визначається за допомогою значення кута φ_1 з врахуванням показів навігаційної підсистеми мобільного вимірювального агента. На основі значення коефіцієнта температуропровідності a робиться попередній висновок про концентрацію зважених частинок.

Орієнтовні розрахунки показали, що наведену вище залежність f доцільніше використовувати для визначення характеру мікроструктурних переміщень (порівняно малі швидкості переміщення води). У випадку визначення швидкості і напрямку власне течії (порівняно великі швидкості переміщення води) доцільніше шукати залежність f з задачі нестационарної тепловіддачі від кулі, що рухається у в'язкій рідині [77].

Значення температури трьох здавачів температури ставляться у відповідність кутам $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$, шляхом сортування цих значень по спаданню. Тобто, якщо $T^>T^>>T^>>>$, то $T^> \rightarrow T(\varphi_2)$, $T^>> \rightarrow T(\varphi_1)$, $T^>>> \rightarrow T(\varphi_3)$.

4.3. Розв'язок задачі рівномірного оточення зони збурень колективом мобільних вимірювальних агентів

Під зоною збурень будемо розуміти обмежену замкнуту область зони моніторингу, в якій досліджуваний параметр приймає значення з певного наперед заданого діапазону. Границею зони збурень є умовна лінія, де значення параметра виходить за межі заданого діапазону. Ця лінія є замкнутою динамічною контурною лінією.

Перед колективом агентів ставиться задача знайти зону збурень, рівномірно розподілитися вздовж її границі і підтримувати рівномірний розподіл при змінах її форми та розмірів в умовах відсутності центрального керуючого органу і обмеженого радіуса видимості засобів зв'язку [83-85].

Будемо вважати, що агенти розподілені рівномірно, якщо довжина відрізка границі зони збурень між положеннями будь-яких двох сусідніх агентів буде однаковою. Іншими словами, довжина відрізка контуру між даним агентом та його сусідом по контуру за годинниковою стрілкою повинна бути однаковою для всіх агентів і дорівнювати загальній довжині контуру, поділеній на кількість агентів, тобто

$$d_i(t) = \text{const} = \frac{L}{N}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (4.17)$$

де $d_i(t)$ – довжина відрізка контуру між i -им агентом і його сусідом за годинниковою стрілкою в момент часу t ; L – загальна довжина контуру; N – кількість агентів.

При такому визначенні рівномірності розподілу введемо декілька критеріїв, за якими будемо її оцінювати [83]:

1. Максимальне відхилення відстані між сусідніми агентами від номінальної в момент часу t :

$$K_{\max}(t) = \max\left(\left|d_i(t) - \frac{L}{N}\right|\right), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4.18)$$

2. Середньоквадратичне відхилення довжин відрізків контуру між агентами від довжини відрізка, яка повинна бути при рівномірному розподілі:

$$K_{\delta^2}(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(d_i(t) - \frac{L}{N} \right)^2}, \quad (4.19)$$

Якщо алгоритм поведінки агентів збігається до рівномірного розподілу, то функції $K_{\max}(t)$ та $K_{\delta^2}(t)$ повинні монотонно спадати з часом і наближатися до нуля.

Нехай кожний мобільний вимірювальний агент може проводити лише контактні вимірювання, тобто отримувати значення досліджуваного параметра в тій точці простору, де він в даний момент знаходиться. Агенти працюють в дискретному часі і мають можливість на кожному кроці змінити свою швидкість на деяке максимальне значення a_{dv} і напрямок руху на деякий максимальний кут a_{da} . Максимальна швидкість агента обмежена значенням $max_velocity$. Нехай у вибраній момент часу агент має швидкість v та напрямок руху a , а на наступному кроці він змінить свою швидкість на dv (нагадаємо, що $-a_{dv} < dv < a_{dv}$), а напрямок руху – на da ($-a_{da} < da < a_{da}$).

За таких припущень координати агента будуть змінюватись:

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= x_t + v \cdot \cos(a) \\ y_{t+1} &= y_t + v \cdot \sin(a) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Таким чином, перед агентами стоять три основних завдання: пошук границі зони збурень (динамічної замкнутої контурної лінії); рух вздовж цієї лінії; координація дій з сусідами так, щоб розміститися вздовж лінії рівномірно.

4.3.1. Алгоритми пошуку границі зони збурень

Розглянемо три варіанти початкового розміщення агентів: компактне розміщення групою всередині контуру; периферійне розміщення, коли всі агенти початково розміщені поза контуром; випадкове розміщення. Залежно від способу початкового розміщення будуть відрізнятися і методи пошуку границі зони збурень [83].

При компактному розміщенні всередині зони збурень можливим алгоритмом пошуку буде формування колективом кола, яке початково має невеликий радіус, але з часом коло розширюється доки агенти не потраплять на границю (рис. 4.7,а).

При периферійному розміщенні агенти, навпаки, утворюють коло великого радіуса (описане навколо початкових позицій агентів) і рухаються до його центра доки не попадуть на границю (рис. 4.7,б).

При довільному початковому розміщенні колективу агентів можливим способом пошуку є прочісування території кожним агентом, тобто проведення розгортки площини. При цьому може використовуватись будь-яка з відомих розгорток – рядкова, спіральна та ін. Рядкова розгортка для реальних робіт вимагатиме значних витрат енергії, тому більш привабливими є різні види спіральних розгорток – прямокутна спіраль, спіраль Архімеда тощо (рис. 4.7,в).

4.3.2. Алгоритми руху вздовж границі зони збурень

Розглянемо алгоритми руху окремого агента вздовж контурної лінії. Одним з можливих методів руху вздовж невідомого контуру (відслідковування контуру) є використання слідкуючих розгорток [83].

При «слідкуючій» розгортці траєкторія повністю визначається самою функцією, що розгортається. Це досягається в результаті спеціального вибору кожної наступної точки траєкторії, причому вибір здійснюється так, щоб наступна точка траєкторії максимально відповідала вимогам, які висунуті для відслідковування. Зокрема, в більшості методів відслідковування контурів кожна наступна точка траєкторії по можливості точно суміщається з контуром, незалежно від того, як розміщена відносно контуру попередня точка.

З того, що кожна наступна точка траєкторії слідкуючої розгортки повинна вибиратися найкращим в певному розумінні чином, з необхідністю впливає, що такий вибір здійснюється в результаті деякої кількості спроб можливих продовжень траєкторії, найкраща з яких і вважається потрібною. Дослідження околу останньої знайденої точки траєкторії з метою виявлення наступної точки пов'язане з допоміжним процесом розгортки, який надалі називається «локальна розгортка». Розглянемо метод відслідковування із спіральною локальною розгорткою.

Використовуючи спіральну локальну розгортку, агент рухається по траєкторії, яка складається з відрізків спіралей, що розкручуються (рис. 4.8).

Очевидно, чим сильніше розкручується спіраль, тим сильніше стягується траєкторія до контуру; але крок спіралі повинен залишатись достатньо малим, так як при різкій зміні напрямку контуру можливе зниження точності слідкування або втрата контуру (рис. 4.9).

Алгоритм руху вздовж контуру за спіральною локальною розгорткою з перетином контуру (рис. 4.8,а) (тут *local_radius* – це максимальний радіус спіралі) має наступний вигляд:

Алгоритм 4.3.1.

```

1. Якщо (на попередньому кроці був перетин з контуром) то
{
    da = -da; // починаємо обхід в іншому напрямі
    якщо (velocity > local_radius) то dv = -a_dv;
    інакше dv = 0; //приводимо швидкість до значення local_radius
}
інакше // рухаємось по спіралі
{
    da = 0.5*da; //напрямок руху змінюється зі швидкістю, що зменшується
    якщо (velocity < local_radius) то dv = a_dv;
    інакше dv = 0; //приводимо швидкість до значення local_radius
};
2. velocity = velocity + dv;
   v_angle = v_angle + da;
3. Перейти до п.1.

```

4.3.3. Розв'язок задачі рівномірного розподілення агентів

вздовж границі зони збурень

Розглянемо алгоритми та можливі способи колективної поведінки агентів, які спрямовані на те, щоб розподілитися рівномірно вздовж контуру, що відслідковується. На цьому етапі вважаємо, що вже всі агенти знайшли границю зони збурень і рухаються по ній [83].

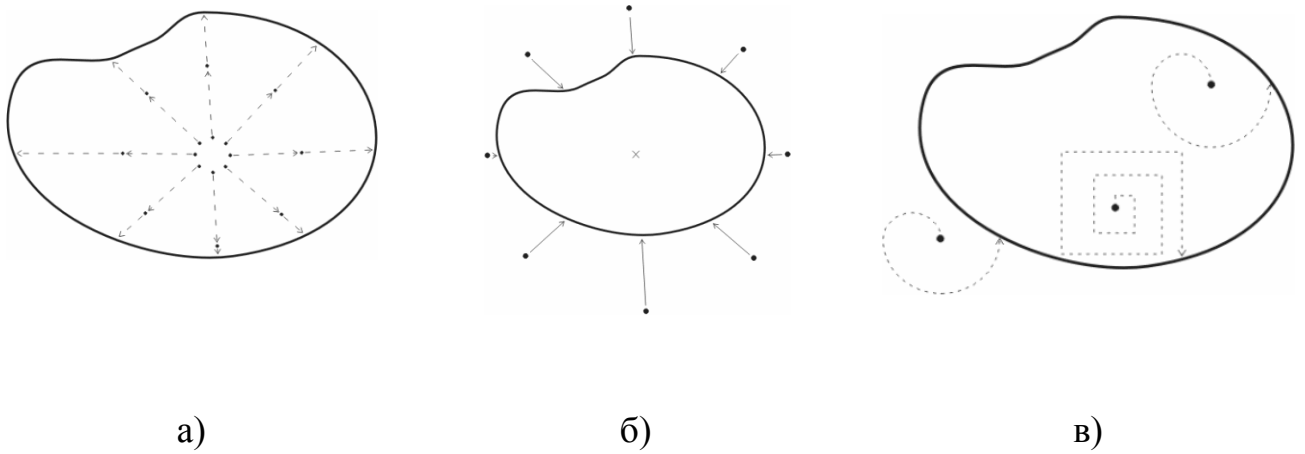


Рис. 4.7. Пошук зони збурень

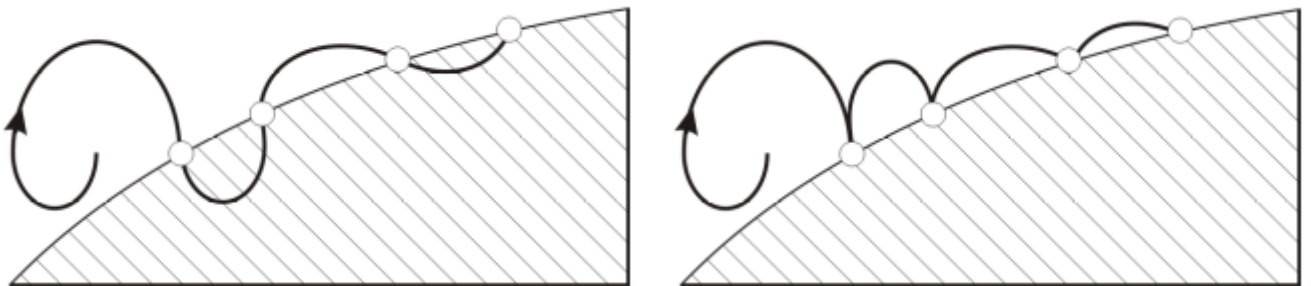


Рис. 4.8. Спіральна локальна розгортка:
а) з перетином контуру; б) з відбиванням від контуру

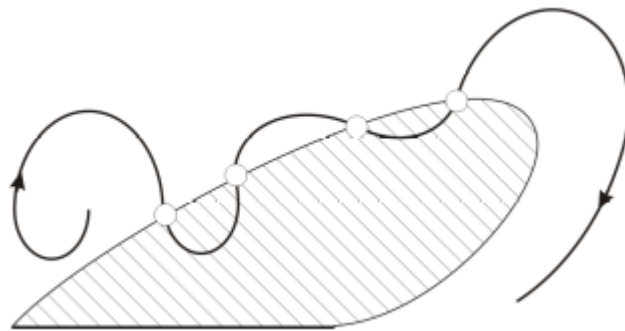


Рис. 4.9. Втрата контуру при надто великому кроці
спіральної локальної розгортки

Нижче розглянемо деякі можливі алгоритми розподілу залежно від рівня організації колективу агентів.

Розглянемо алгоритм з локальною взаємодією агентів [83]. Якщо агенти можуть тільки визначити присутність або відсутність сусіда на деякій малій порівняно з довжиною контуру відстані, тобто їх радіус видимості $R \ll L$, то єдиною можливою їх дією при зустрічі з сусідом може бути розворот і рух по контуру в іншому напрямку:

Алгоритм 4.3.2.

1. Рухатись вздовж контуру.
2. Якщо (зустрів сусіда), то почати обхід контуру в іншому напрямку.
3. Перейти до п.1.

При такому способі організації мова про оцінку рівномірності розподілу іти не може, але при достатньо великій кількості агентів, вони будуть розподілятися досить рівномірно.

Якщо припустити, що радіус видимості агентів порівняний або більший за розміри контуру ($R \approx L$) і вони вмюють визначати відстань до своїх сусідів, то можна запропонувати наступний алгоритм поведінки:

Алгоритм 4.3.3.

1. $r = 0$.
2. Якщо (відстань до найближчого робота менша r), то почати обхід контуру в напрямку від нього.
3. Якщо (є сусіди з обох боків на відстані менше r), то зупинитись і стояти на місці.
4. Збільшити r .
5. Перейти до п.2.

В цьому випадку агенти будуть поводитись як надувні кульки, які, роздуваючись, розштовхують одна одну по контуру. При цьому необхідно слідкувати, щоб радіус «роздування» в кожний момент часу у всіх агентів був однаковим. Оскільки контур замкнутий і має скінченну довжину, а радіус «роздування» постійно збільшується, то через деяке число кроків агенти розмістяться на контурі на однаковій відстані один від одного.

Алгоритм «надувних кульок» є простим і наочним, але він має декілька істотних недоліків. Зокрема, агенти вимірюють відстань до сусідів по прямій лінії, а не вздовж контуру, тому їх розподіл не буде рівномірним у розумінні, викладеному вище, якщо контур не є достатньо гладким (див. рис. 4.10 – хоча агенти стоять на рівних відстанях один від одного, відрізок контуру d_4 набагато довший, ніж d_1 , d_2 чи d_3).

Для уникнення цього потрібно, щоб кожний агент вимірював відстань до своїх сусідів не по прямій, а за шляхом, який він пройшов по контуру, і своїх сусідів ідентифікував тільки при безпосередній зустрічі на контурі. Тому введемо для кожного агента локальну одновимірну систему координат, в якій він буде визначати своє положення на контурі. За початок відліку візьмемо точку, в якій агент потрапив на контур, а за додатній напрям, наприклад, обхід за годинниковою стрілкою.

Тепер будемо «роздувати кульку» не на площині, а в цій одновимірній системі координат. Тобто агент рухається на деяку відстань r в одному напрямі, розвертається і рухається назад до початку координат, потім на таку ж відстань в протилежному напрямі, а потім знову до початку координат. Якщо на цьому шляху він не зустрів інших агентів, то відстань r збільшується. Таким чином, рух агента буде нагадувати маятник, який коливається із зростаючою амплітудою (рис. 4.11).

Якщо ж агент зустрічає сусіда на своєму шляху, то він зміщує на деяку величину свій центр коливань в протилежну сторону. Таким чином буде відбуватися розштовхування агентів. Короткий опис алгоритму матиме вигляд (x – біжуча координата робота в його локальній системі координат; Δx – зміна координати на біжучому кроці; dx – крок зміщення центра коливань):

Алгоритм 4.3.4.

1. $r = 0$.
2. $x = 0$.
3. Якщо (рух в додатному напрямку), то $x = x + \Delta x$, інакше $x = x - \Delta x$.
4. Якщо ($|x| > r$), то почати обхід контуру в іншому напрямі.
5. Якщо (зустрів сусіда), то

{
 Якщо (рух в додатному напрямку), то $x = x + dx$, інакше $x = x - dx$.
 }.

6. Збільшити r .
 7. Перейти до п.3.

Вздовж контуру агент рухається за одним з методів, описаних вище, тому для визначення величини Δx будемо проводити лінійну апроксимацію контуру по двох точках – точці перетину з контуром на даному циклі локальної розгортки і точці перетину на попередньому циклі (рис. 4.12). Якщо радіус локальної розгортки достатньо малий порівняно з кривизною контуру, то така апроксимація буде досить точною.

Тоді,

$$\Delta x = \sqrt{(curr_x - prev_x)^2 + (curr_y - prev_y)^2} \quad (4.21)$$

Основним недоліком такого руху є те, що агенти не зможуть ніколи зустрітися і почати розштовхування, якщо всі вони починають коливання в одному напрямку. Для запобігання цього напрямком обирається випадковим чином.

4.3.4. Алгоритм просторової самоорганізації агентів з локальною передачею інформації

У всіх попередніх алгоритмах вважалося, що мобільні вимірювальні агенти не можуть обмінюватись інформацією. Якщо зняти таке обмеження і припустити, що агенти можуть обмінюватись повідомленнями і ідентифікувати один одного (наприклад, за унікальними номерами), то можна запропонувати наступний алгоритм просторової організації вимірювальних агентів [83].

Знайшовши контур, агент починає рухатись по ньому доки не зустріне сусіда. При зустрічі агенти ідентифікують один одного (тобто запам'ятовують унікальний номер сусіда, наприклад, «мій сусід за годинниковою стрілкою – це агент під номером 5») і узгоджують свої системи координат (агент запам'ятовує наскільки зміщена система координат сусіда відносно його власної), і після цього починають рух в протилежному напрямі до зустрічі з сусідом з іншої сторони.

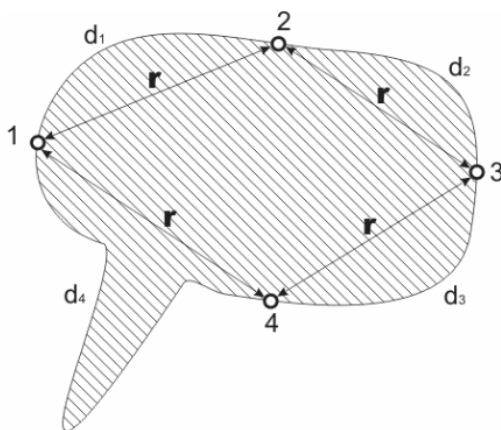


Рис. 4.10. Робота алгоритму «надувних кульок»

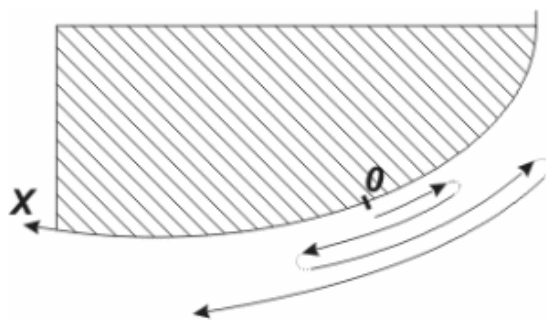


Рис. 4.11. Робота алгоритму «маятника»

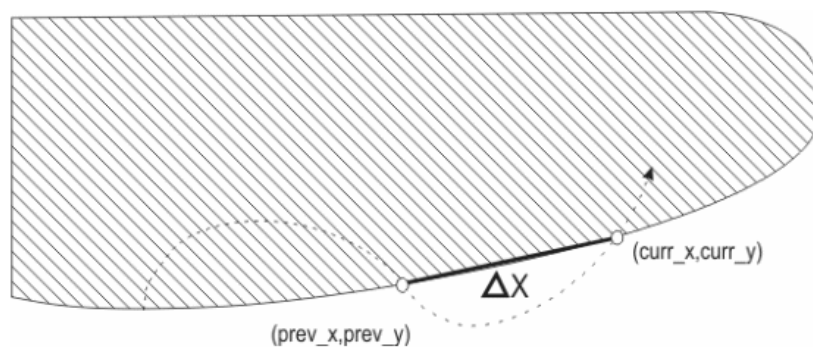


Рис. 4.12. Визначення зміщення вздовж контуру за допомогою лінійної апроксимації

Коли агент знайшов своїх сусідів з одного і з іншого боку, то на кожному наступному кроці він запитує в них їхні координати і, знаючи зміщення їх систем координат відносно своєї, визначає координату середини відрізка контуру між ними та рухається до неї (назвемо цей алгоритм «медіанним») (Алгоритм 4.3.5.).

Алгоритм 4.3.5.

```

1. лів_сусід=0, прав_сусід=0.
2.  $x = 0$ ,  $x_{\text{сер}}=0$ .
3. Якщо ( рух в додатному напрямку ), то  $x = x + \Delta x$ , інакше  $x = x - \Delta x$ .
4. Якщо ( зустрів сусіда ) і ( рух в додатному напрямку ), то
{
    лів_сусід = номер сусіда.
    почати обхід контуру в іншому напрямі.
}.
5. Якщо ( зустрів сусіда ) і ( рух у від'ємному напрямі ), то
{
    прав_сусід = номер сусіда.
    почати обхід контуру в іншому напрямі.
}.
6. Якщо ( лів_сусід  $\neq 0$  ) і ( прав_сусід  $\neq 0$  ), то
{
     $x_{\text{сер}} = ( \text{лів\_сусід} \rightarrow x + \text{прав\_сусід} \rightarrow x ) / 2$ .
    Якщо (  $x_{\text{сер}} < x$  ) і ( рух в додатному напрямку )
    або (  $x_{\text{сер}} > x$  ) і ( рух у від'ємному напрямку ),
    то почати обхід контуру в іншому напрямку.
}.
7. Перейти до п.3.
```

Результати моделювання показують, що при такому методі руху розподіл агентів з часом прямуватиме до рівномірного. Але, як і в попередньому алгоритмі, якщо спочатку роботи починають рух в одному напрямі, то ніколи не зможуть зустріти сусідів та ідентифікувати їх. Щоб уникнути цього ведемо в поведінку колективу агентів поняття стаціонарного стану. Нехай, потрапивши на контур, всі агенти переходять до стаціонарної розгортки, не просуваючись вздовж контуру. Після того, як всі агенти знайшли контур, відбуваються вибори агента – тимчасового лідера, який почне рух вздовж контуру, наприклад, за годинниковою стрілкою. Вибори можуть проводитись за номерами (наприклад, агент з найменшим номером починає рух) або за принципом випадкового доступу.

Зустрівши сусіда, агент-лідер обчислює координату середини пройденого відрізка x_c , повідомляє її сусіду і починає рухатись проти годинникової стрілки до

x_c , де й зупиняється. Сусід, «отримавши естафету», рухається за годинниковою стрілкою до наступного агента, i , знаючи, де зупинився попередній агент, обчислює координату середини відрізка між попереднім і наступним агентом і рухається до неї і так далі. Таким чином, вздовж контуру буде рухатись «хвилька», після проходження якої агенти будуть розміщуватися все більш рівномірно (Алгоритм 4.3.6.).

Алгоритм 4.3.6.

Стан 1.

- 1.1. $x = 0$.
- 1.2. стояти на місці.
- 1.3. Якщо (всі агенти на контурі), то вибрати лідера.
- 1.4. Якщо (y – лідер), то перейти в стан 2.
- 1.5. Перейти до п. 1.

Стан 2.

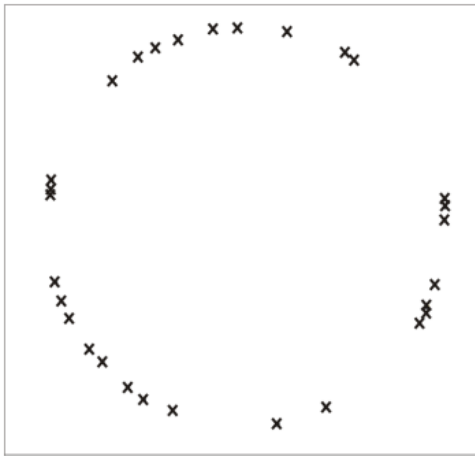
- 2.1. Рухатись вздовж контуру за годинниковою стрілкою.
- 2.2. $x = x + \Delta x$.
- 2.3. Якщо (зустрів сусіда), то
 - {
 - $x_c = (x_c + x) / 2$.
 - передати сусіду значення x_c .
 - передати сусіду вказівку перейти в стан 2.
 - перейти в стан 3.
 - }

- 2.4. Перейти до п. 1.

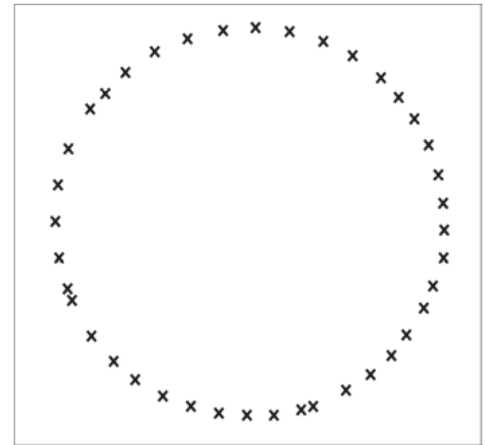
Стан 3.

- 3.1. Рухатись вздовж контуру проти годинникової стрілки.
- 3.2. $x = x - \Delta x$.
- 3.3. Якщо ($x = x_c$), то перейти в стан 1.
- 3.4. Перейти до п. 3.1.

Нижче наведено результати обчислювального експерименту, в якому 40 агентів повинні були розміститися на колі, діючи за “медіанним” алгоритмом (рис. 4.13, рис. 4.14). З рис. 4.14. видно, що критерії оцінки рівномірності розподілу $K_{\max}(t)$ і $K_{\delta^2}(t)$ збігаються. Отже, «медіанний» алгоритм приводить до розв’язку задачі рівномірного розподілу агентів по контуру зони збурень, але збігається він досить повільно. Це пов’язано з тим, що перерозподіл агентів в кожний момент часу проходить тільки в одній ділянці контуру [83].

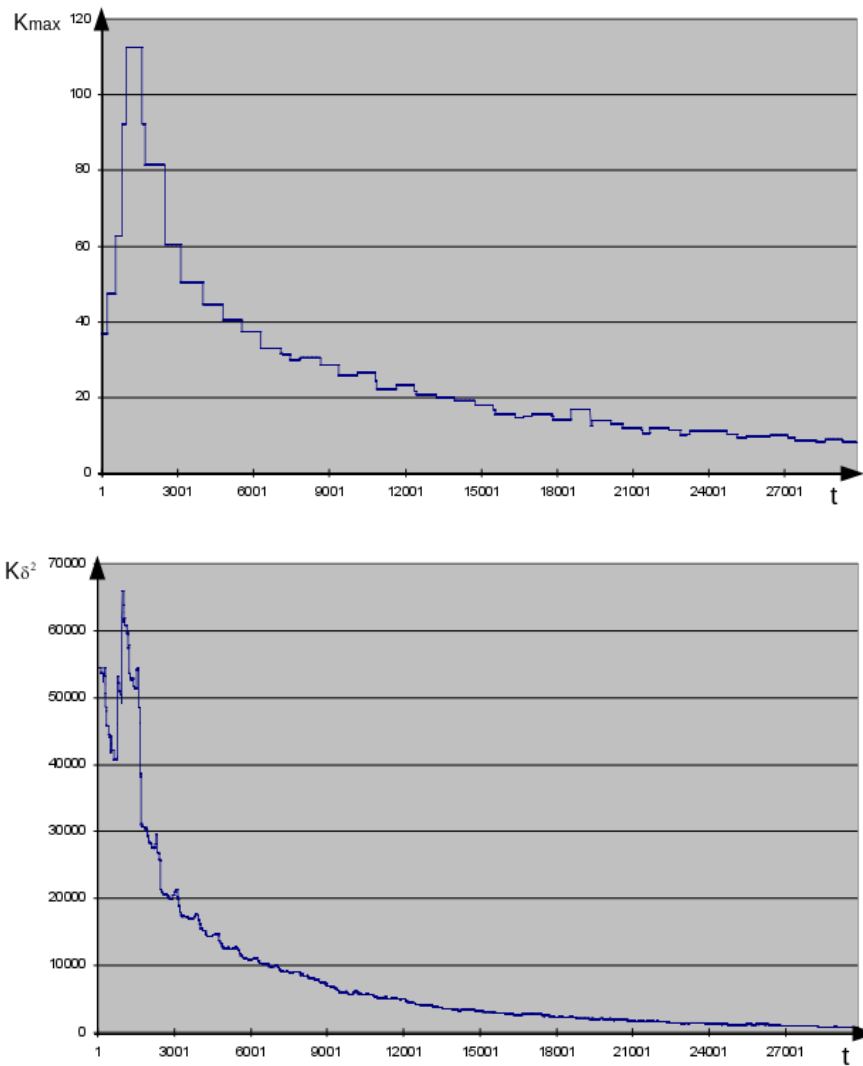


а) початкове розміщення агентів



б) кінцеве розміщення агентів

Рис. 4.12. Результати моделювання «медіанного» алгоритму

Рис. 4.13. Залежності $K_{\min}(t)$ та $K_{\delta^2}(t)$ отримані для «медіанного» алгоритму

4.4. Розв'язок задачі рівномірного розподілу обмеженої території колективом мобільних вимірювальних агентів

Проблема організації колективної поведінки в задачах рівномірного розподілу деякої обмеженої території набуває все більшої актуальності у світлі останніх досягнень та бурхливого розвитку розподіленої робототехніки, агентно-орієнтованих технологій побудови розподілених програмних систем та інших областей застосування концепції багатоагентних систем. В найбільш загальному вигляді зміст цих задач полягає у "справедливому" в деякому сенсі поділі заданої обмеженої області простору (території) на індивідуальні зони відповідальності агентів [86-87]. При цьому процес поділу відбувається 1) за умов відсутності єдиного центру управління діями агентів (кожний з агентів приймає рішення самостійно) та 2) за умов обмеженої інформаційної взаємодії між агентами (тип та параметри цих обмежень визначаються згідно відповідної моделі інформаційної взаємодії агентів). Слід також відмітити, що проблема рівномірного розподілу території колективом агентів має дуже широкий спектр змістовних інтерпретацій, починаючи з поведінки колективу робототехнічних мобільних агентів в задачах картографування (mapping) та спостереження (surveillance) [41,88] і закінчуючи колективною поведінкою обчислювальних агентів в задачах розподілу спільних обчислювальних ресурсів [89]. В зв'язку з цим доцільно підкреслили, що територія, яка підлягає розподілу між агентами - це не обов'язково ділянка фізичного простору. В контексті деяких змістовних інтерпретацій "обмежена територія" трактується як область параметричного (фазового) простору, в якому роль координати грає значення одного чи декількох параметрів, які може змінювати окремий агент.

На даний час існує велика кількість робіт, присвячених дослідженню різних аспектів зазначеної проблеми [86-88,90-92]. Це зокрема роботи в області розподіленої робототехніки [88], децентралізованого управління [90,91] та колективної поведінки віртуальних агентів [92]. Слід також вказати на тісний взаємозв'язок даної проблеми з іншими задачами просторової самоорганізації

колективу мобільних агентів [72-74,92]. Наприклад, багато спільних рис з проблемою рівномірного розподілу території має так звана "проблема охорони художньої галереї" (art gallery problem) [74]. В задачах просторової самоорганізації цього типу одночасно присутні дві "невизначеності": 1) невизначеність обумовлена нестачею інформації про розмір та конфігурацію території, в межах якої розміщені агенти; та 2) невизначеність обумовлена нестачею інформації про біжуче розташування та подальші дії інших агентів (внаслідок повністю децентралізованого управління та обмеженої інформаційної взаємодії між агентами) [74]. Відповідно основними елементами у тому чи іншому рішенні цих задач є механізми подолання нестачі інформації зазначених двох типів. При цьому в наукових пошуках таких рішень склалися дві основні тенденції: 1) пошук рішень у вигляді набору евристичних правил [41,86,88,92]; 2) пошук рішень у вигляді рішення відповідним чином сформульованої задачі оптимального управління [90,91].

Недоліком першої тенденції є відсутність формального доказу коректності та збіжності запропонованих рішень, працездатність яких натомість оцінюється експериментальним шляхом на прикладі вирішення модельних (тестових) задач. На відміну від цього в рамках другої тенденції, як правило, отримують формальні докази коректності та збіжності запропонованих рішень, стикаючись при цьому з великими труднощами внаслідок децентралізованості та великої розмірності відповідної задачі оптимального управління [87]. В даному випадку поведінка кожного мобільного агента задається окремим диференціальним рівнянням (або системою диференціальних рівнянь). Відповідно математична модель колективної поведінки агентів в такому представленні - це занадто складний об'єкт для прямого застосування відомих методик пошуку рішень задачі оптимального управління. В роботах, що належать до другої тенденції, ця проблема вирішується шляхом «спрощення» відповідної математичної моделі на основі низки обмежуючих припущень [88,90,91], що в свою чергу значно звужує область використання розроблених рішень.

Крім цього в якості спільного недоліку обох тенденцій необхідно підкреслити заглиблення у специфічні деталі роботи окремої мобільної робототехнічної платформи та намагання отримати рішення на рівні відповідних сигналів управління та вхідної сенсорної інформації. Іншими словами переважна більшість запропонованих рішень сильно залежать від специфіки обраного авторами цих рішень способу організації переміщення окремого мобільного агента в просторі [87].

Розглянемо проблему розробки узагальненого підходу до вирішення проблеми організації колективної поведінки мобільних агентів в задачах рівномірного розподілу обмеженої території, який би дозволив знайти універсальні гарантовані розв'язки на більш високому «організаційному» рівні прийняття рішень, тобто на рівні координації спільних колективних дій.

Концепція рішення базується на принципі ієрархії («вкладеності») процесів управління та прийняття рішень [8,9,74,87], застосування якого дозволяє абстрагуватись від специфіки способу організації переміщення агента в просторі та відповідних деталей колективної поведінки. Як перший крок в цьому напрямку можна розглядати створення координаційних механізмів на основі інтегральних характеристик взаєморозміщення агентів. До таких механізмів зокрема можна віднести рішення на основі діаграм Вороного [90], різні варіанти метода штучних потенціалів [41,91], методи на основі рішень математичної проблеми вкриття або заповнення деякої обмеженої площини однаковими геометричними фігурами [86] та ін. Наступний крок в цьому напрямку полягає в подальшому «відокремленні» механізму координації спільних колективних дій від «геометричних» характеристик біжучого стану процесу вирішення задачі.

З цією метою можна запропонувати наступний узагальнений підхід [87], згідно якого

1) обмежена територія Ω , яка підлягає розподілу між n агентами, відображається у спільний обмежений ресурс R :

$$F_{\Omega}: \varphi_k(\Omega) \rightarrow R, \quad (3.22)$$

де $\varphi_k(\Omega)$ – функція, яка визначає потрібну характеристику обмеженої території Ω (наприклад, лише площу або форму і площу Ω);

2) індивідуальна зона відповідальності агента ρ_i відображається у його частку спільного обмеженого ресурсу r_i :

$$F_\rho: \varphi_a(\rho_i) \rightarrow r_i. \quad (3.23)$$

де $\varphi_a(\rho_i)$ - функція, яка визначає потрібну характеристику індивідуальної зони відповідальності агента ρ_i .

При цьому в будь який момент часу t справедлива нерівність

$$\sum_{i=1}^n r_i(t) \leq R. \quad (3.24)$$

Відповідно перед колективом агентів постають дві підзадачі: 1) з'ясувати наперед невідому величину спільного ресурсу R та 2) розподілити цей спільний ресурс порівну в такий спосіб, щоб частка кожного агента дорівнювала $r^* = R/n$. Таким чином умова вирішення першої підзадачі полягає у забезпеченні

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left[\sum_{i=1}^n r_i(t) \right] = R, \quad (3.25)$$

тоді як умова вирішення другої підзадачі полягає у забезпеченні для всіх $i=1, \dots, n$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} r_i(t) = r^*. \quad (3.26)$$

Крім цього в рамках узагальненого підходу розглядаються наступні три допоміжні функції.

1) Функція доступу до ресурсу $f_d(t)$, яка визначає можливості i -того агента щодо збільшення або зменшення його індивідуальної частки ресурсу r_i в момент часу t (тобто визначає алфавіт доступних на даному кроці дій $\{d\}_t$ для кожного агента). За допомогою цієї функції моделюється нерівність агентів внаслідок обмеженої "свободи переміщень", спричиненої їх біжучим взаєморозташуванням та формою обмеженої території Ω .

2) Функція оцінки індивідуальної частки ресурсу агента $f_r(t)$, яка визначає можливості i -того агента щодо визначення своєї зони індивідуальної відповідальності. За допомогою цієї функції моделюються ситуації неточного або помилкового визначення агентом величини r_i , а також можливі конфліктні

ситуації, коли два або більше агента "змагаються" за одну і ту саму ділянку Ω (і відповідну частку спільного ресурсу).

3) Функція оцінки витрат на переміщення $f_q(t)$, яка визначає ціну того чи іншого рішення агента щодо зміни його індивідуальної частки ресурсу r_i в момент часу t . За допомогою цієї функції моделюються особливості способу організації переміщення агента у просторі [15] у вигляді залежності дія-ціна.

Таким чином згідно запропонованого підходу кожний агент (рис. 4.15) визначає біжучу величину своєї частки спільного ресурсу та свої можливості (алфавіт доступних дій) щодо її зміни за допомогою функцій $f_r(t)$ та $f_d(t)$. Крім цього агент визначає ціну попередньої дії за допомогою функції $f_q(t)$. Після цього на основі значення $r_i(t)$ та результату $f_q(t)$ за допомогою функції V обчислюється величина біжучого виграшу s , яка відображає успішність індивідуальних дій агента в процесі вирішення поставленої задачі. Ця величина використовується в якості підкріплення в механізмі навчання з підкріпленням M , метою якого є максимізувати кількість успішних дій згідно обраної моделі оптимальної поведінки. Результатом роботи цього механізму є команда (обрана дія d), яка надсилається для виконання підсистемі переміщення. Крім цього в роботі механізму навчання з підкріпленням може бути передбачено обмін координуючими повідомленнями з іншими агентами на основі відповідного механізму координації C та протоколу між-агентної взаємодії.

Відповідно рішення проблеми рівномірного розподілу згідно запропонованого узагальненого підходу полягає у синтезі таких (V, M, C) які б при заданих $\varphi_k(\Omega)$, $\varphi_a(\rho_i)$, $f_d(t)$, $f_r(t)$, $f_q(t)$ забезпечували виконання умов (3.25) і (3.26). В даному випадку можна провести пряму аналогію з відомими задачами на розподіл ресурсів колективом агентів [1,9], в яких однак відсутня невизначеність щодо величини спільного обмеженого ресурсу, який розподіляється між агентами по схемі запит-відповідь деяким арбітром (центром розподілу ресурсу). При вирішенні проблеми рівномірного розподілу обмеженої території такий центр відсутній, внаслідок чого виникає проблема його заміни деяким механізмом координації колективних дій.

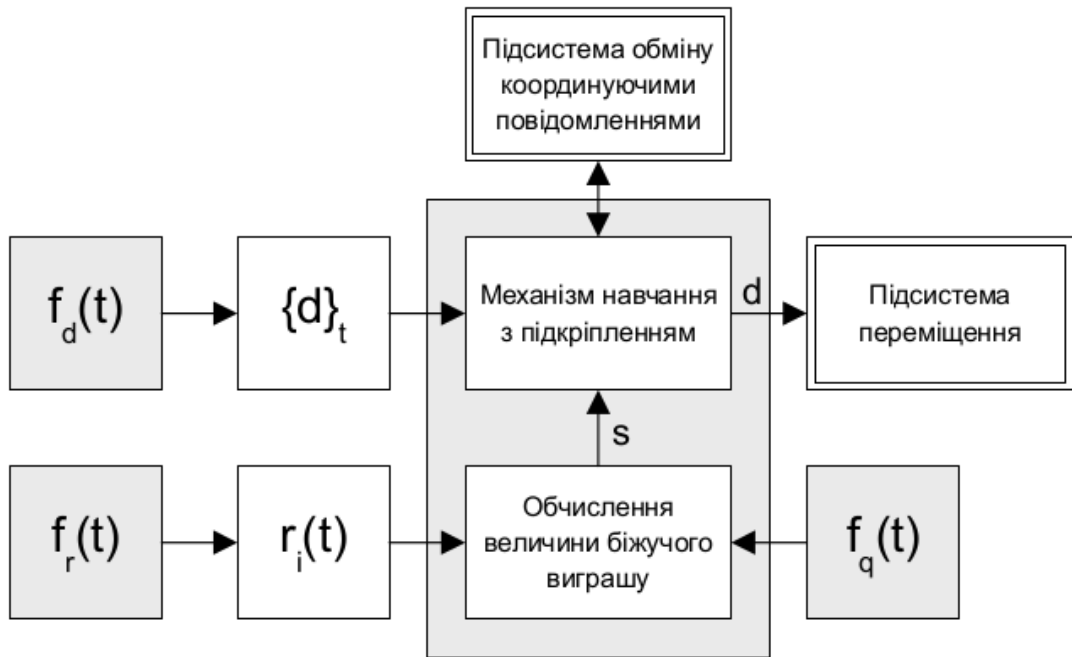


Рис. 4.15. Функціональна схема мобільного вимірювального агента

В якості такого механізму на нашу думку доцільно використати метод ігрової координації багатоагентних систем [93-96]. Цей метод побудований на ідеї використання стану рівноваги за Нешем в деякій "фіктивній" грі (fictitious play), яку розігрують між собою агенти, в якості цільового термінального стану «врівноваженості» індивідуальних інтересів агентів (компромісне рішення як результат координації).

Згідно цього методу агенти починають гру за умов невизначеності щодо матриці виграшів та обирають свою стратегію на перших кроках випадковим чином. В процесі гри кожний гравець виконує алгоритм ігрового навчання з підкріпленням (огляд таких алгоритмів наведено в [95]), за рахунок чого накопичується досвід про дійсні значення матриці виграшів та відбувається пошук оптимальної стратегії, яка забезпечує стан рівноваги за Нешем. З точки зору застосування цього методу координації для вирішення задачі рівномірного розподілу території, нестача інформації про розмір та конфігурацію території Ω долається за рахунок накопичення досвіду про дійсні значення спеціальним чином організованої матриці виграшів, а нестача інформації про біжуче розташування та подальші дії інших агентів долається за рахунок пошуку кожним агентом оптимальної стратегії, яка забезпечує стан рівноваги за Нешем. Таким чином проблема зводиться до пошуку та організації такої координаційної гри, яка б забезпечувала еквівалентність рівномірного розподілу території (у вигляді виконання умов (3.25) і (3.26)) та стану рівноваги за Нешем у цій грі. З цієї точки зору в якості найбільш перспективних варіантів можна запропонувати наступні координаційні ігри.

Розглянемо метод координації на основі гри в розподілення (allocation game) [97]. У грі в розподілення кожен з n гравців має k стратегій $D=\{d\}$ і $n > k$. В кожній партії гравець обирає одну із стратегій. Тобто колектив гравців розподіляється по стратегіям. Виграш окремого гравця $w(d)$ залежить від того, скільки інших гравців обрали ту саму стратегію, що і він: $w(d) = f(v(d))/v(d)$, де $w(d)$ - виграш, який отримують всі гравці, що обрали стратегію d , $v(d)$ - частка гравців, що обрали стратегію d . При цьому $v(d) = m(d)/n$, де $m(d)$ - кількість

гравців, що обрали стратегію d . Вага стратегії $f(v(d))$ має задовольняти умову $v(d) \leq f(v(d)) \leq v(d)$. Різні за виглядом функції $f(v(d))$ породжують різні варіанти гри в розподілення. В найбільш загальному випадку ці функції можуть бути різними для різних стратегій d . Відповідно в контексті проблеми рівномірного розподілу території під стратегіями розуміються окремі ділянки території (та відповідні частки спільного обмеженого ресурсу). При цьому кількість стратегій та вагові функції $f(v(d))$ підбираються таким чином, щоб забезпечити еквівалентність стану рівноваги за Нешем рівномірному розподілу території. Зокрема можна організувати серію ієрархічно вкладених ігор в розподілення, кожна з яких розігрується у все меншій ділянці простору між тими агентами, які туди "потрапили".

Розглянемо метод координації на основі гри на виживання (game of survival) [97]. В цій грі перед її початком кожному i -му гравцю видається запас деякого ресурсу r_i . Далі в кожній ітерації розігрується однакова гра-компонента з нульовою сумою. Результат гри-компоненти визначає яку частку ресурсу переможений віддає переможцю. В цілому програє («вмирає») той, в кого запас ресурсу вичерпається першим. Після цього гра завершується. При цьому, оскільки загальний для всіх гравців запас ресурсу R з часом не змінюється, гра може продовжуватися нескінченно довго. Відповідно в контексті проблеми рівномірного розподілу території можна запропонувати розіграш "оберненої" гри на виживання, в якій кожен з гравців навпаки намагався би мінімізувати запас свого ресурсу r_i . В результаті стан рівноваги за Нешем стає еквівалентним ситуації, коли в кожного гравця залишається мінімальний запас ресурсу, що можливо лише тоді, коли він у всіх однаковий, тобто рівний r^* . Таким чином пошук оптимальної стратегії кожним з агентів-гравців призведе до вирішення задачі рівномірного розподілу території.

Висновки до розділу 4

1. 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 дозволяє прискорити обчислення в блоці прийняття рішення МВА в середньому на 40,6%.

2. Розв'язано задачу активних сукупних вимірювань колективом мобільних вимірювальних агентів на основі багатофункціонального методу визначення параметрів водного середовища. Розроблено схему роботи багатофункціонального методу. Запропоновано спосіб визначення параметрів природних теплових потоків та спосіб визначення параметрів переміщень водного середовища.

3. Розв'язано задачу рівномірного оточення зони збурень колективом мобільних вимірювальних агентів. Розроблено методи організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в задачі рівномірного оточення зони збурень колективом автономних мобільних вимірювальних агентів. Зокрема запропоновано нові алгоритми пошуку границі зони збурень колективом мобільних вимірювальних агентів, нові алгоритми руху мобільних вимірювальних агентів вздовж границі зони збурень та нові алгоритми рівномірного розподілення мобільних вимірювальних агентів вздовж границі зони збурень.

4. Розв'язано задачу рівномірного розподілу обмеженої території колективом мобільних вимірювальних агентів. Розроблено метод організації адаптивних ВО-процесів в задачах рівномірного розподілу обмеженої території колективом автономних мобільних вимірювальних агентів на основі принципів ігрової координації багатоагентних систем.

5. РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ОРГАНІЗАЦІЇ АДАПТИВНИХ ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОНОМНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ

5.1. Автономна розподілена система моніторингу навколишнього середовища на основі інтелектуальних агентів

В сучасних умовах глобального погіршення екологічної ситуації питання глибокого дослідження, ефективного контролю та прогнозування подальшого протікання процесів оточуючого середовища є надзвичайно важливими. Вирішити ці питання за умов відсутності відповідних засобів вимірювання та обробки даних практично неможливо. Саме тому є актуальною проблема створення систем просторово розподілених вимірювань на базі автономних мобільних інтелектуальних агентів, здатних до самоорганізації з метою вирішення поставлених перед ними дослідницьких задач [17,18]. Відповідні науково-технічні рішення складають один з основних напрямків розвитку концепції кібрефізичних систем [98] – інтелектуальні технології збору даних [99, 100].

Нові вимоги до сучасних систем розподілених вимірювань та екологічного моніторингу змушують переносити акцент досліджень на пошук нових архітектур цих систем та питання, що необхідно вирішувати в рамках цих нових архітектур. Запропоновані в даній роботі методи організації адаптивних ВО-процесів дозволяють розробити новий клас таких архітектур на основі принципів самоорганізації та машинного навчання [101-107]. Зокрема принципи самоорганізації вигідно застосовувати в ситуаціях, коли інтелектуальні агенти системи моніторингу розташовуються у недоступних або небезпечних середовищах [108, 109]. Важливим також залишається питання забезпечення мобільності інтелектуального агента системи моніторингу [110-112]. Структура інтелектуального агента автономної розподіленої системи моніторингу навколишнього середовища (рис. 5.1) має три рівня: ядро агента, внутрішній контур, зовнішній контур. Структурна схема (рис. 5.2.) бортової системи

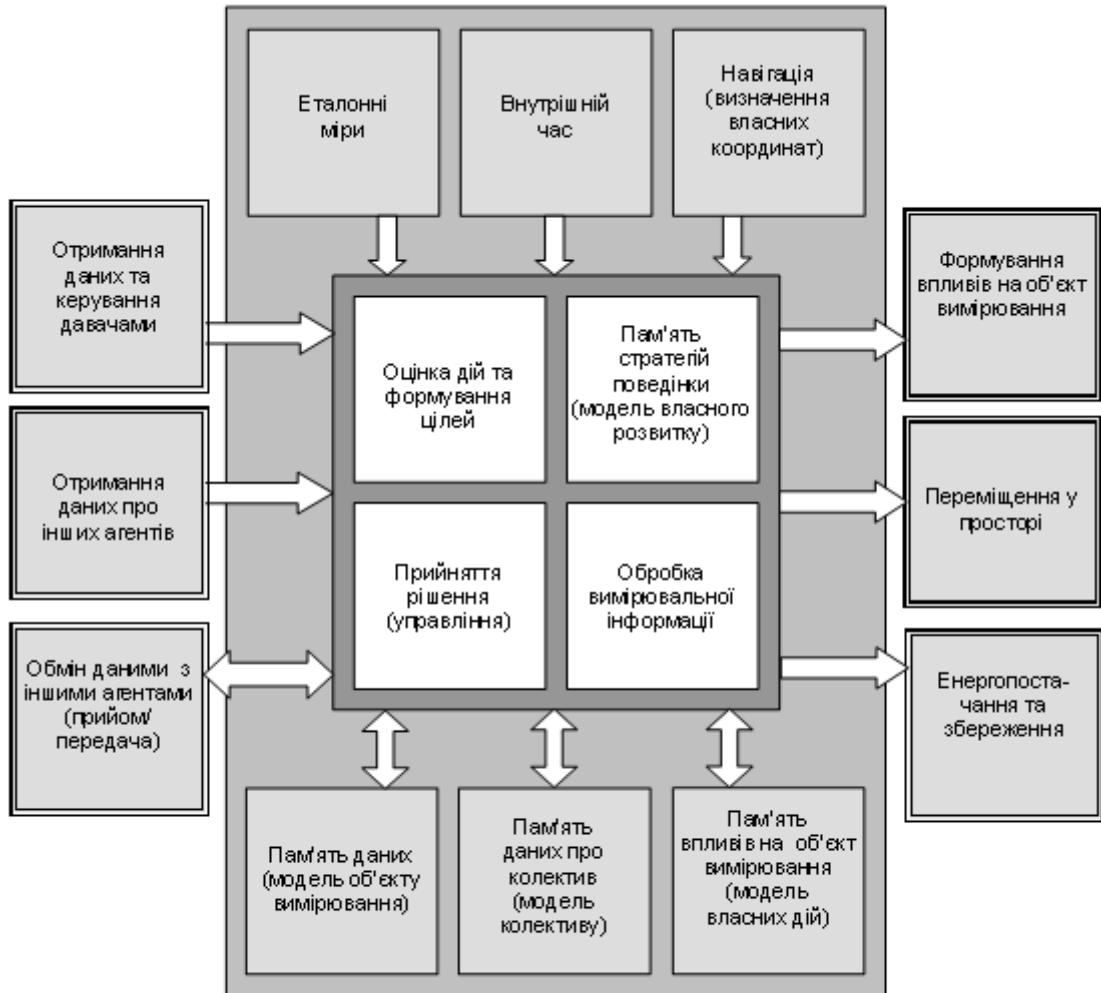


Рис. 5.1. Структура схема інтелектуального агента автономної розподіленої системи моніторингу навколишнього середовища

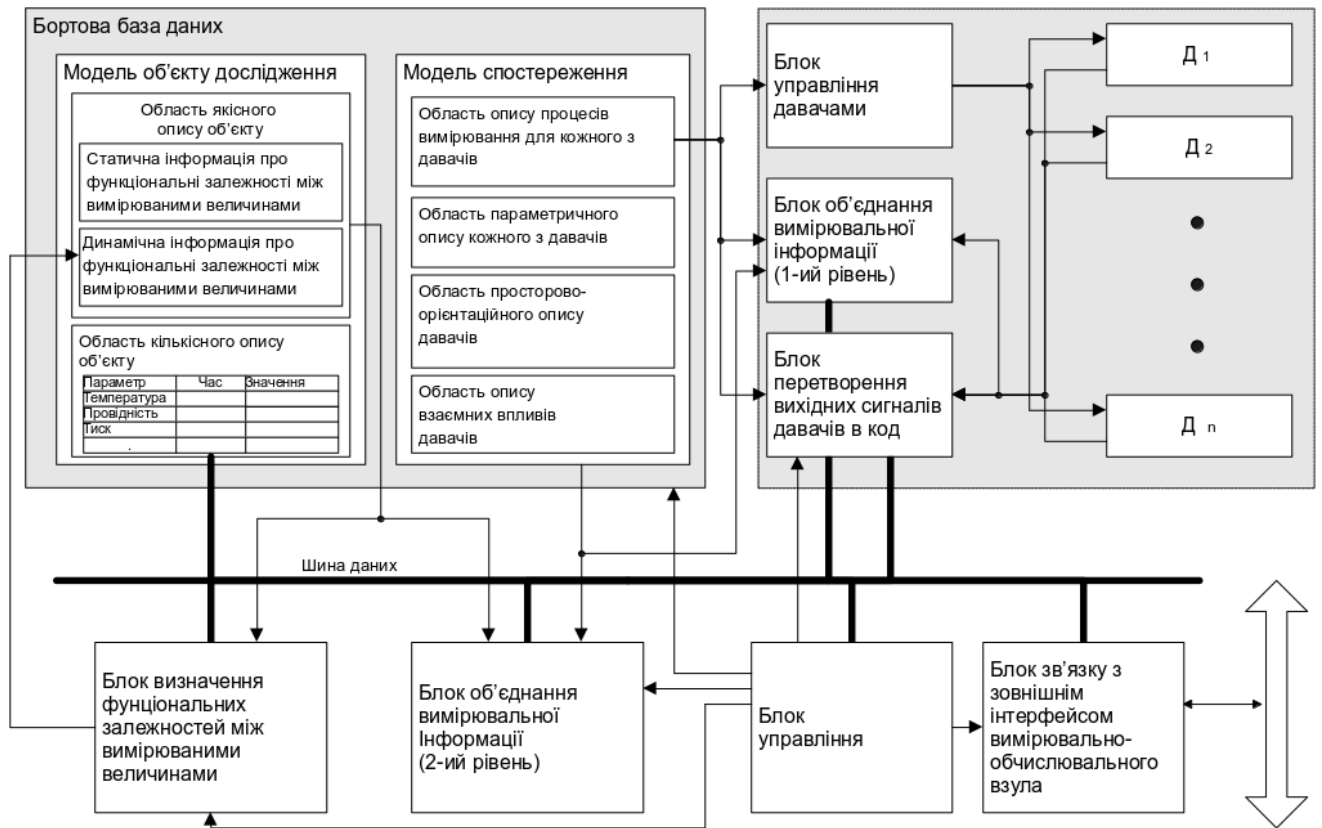


Рис. 5.2. Структурна схема бортової системи первинної обробки даних та керування датчиками інтелектуального агента автономної розподіленої системи моніторингу навколишнього середовища

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.

5.2. Автономна розподілена система виявлення та відстеження порушників на основі бездротової сенсорної мережі

Проблема охорони території від вторгнення деяких об'єктів (далі «порушників») стає все більш актуальною з огляду на розширення кордонів великих міждержавних утворень, збільшення потоків нелегальної імміграції та глобальну загрозу з боку терористичних груп. Внаслідок цього особливо перспективним є розроблення автономної розподіленої системи виявлення та відстеження порушників (СВВП) на основі методів організації адаптивних ВО-процесів та технології багатоагентних систем [113-115]. В даному випадку автономну розподілену СВВП доцільно реалізувати 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. На даний час існує велика кількість засобів спостереження різного призначення, і ця кількість постійно зростає. Відповідно актуальною є проблема їх ефективного використання, включаючи інтеграцію великої кількості різних систем спостереження в єдину систему. Крім цього останнім часом все більш гостро постають проблеми боротьби з тероризмом та захисту кордонів (включаючи проблему нелегальної імміграції). Відповідно існує велика потреба у спеціалізованих системах виявлення та відстеження порушників, які б допомагали вирішувати ці проблеми.

В загальному випадку базова модель процесу виявлення та відстеження переміщень порушників включає наступні основні об'єкти (табл. 5.1): порушник, територія охорони, система виявлення та відстеження порушників, користувач (власник) СВВП, система сповіщення та зв'язку [113-114].

Згідно базового сценарію взаємодії об'єктів концептуальної моделі [113-114] початково деяка кількість вартових агентів розміщується (наприклад, випадковим чином) в межах деякої території, що підлягає охороні. Після цього за допомогою вбудованих засобів безпроводного зв'язку і відповідного алгоритмічного забезпечення вартові агенти самостійно утворюють єдину децентралізовану систему виявлення та відстеження порушників. Кожний вартовий агент споряджений сенсорною системою, за допомогою якої він здійснює свою основну функцію – виявлення порушника та відстеження його переміщень у своїй зоні відповідальності. Іншою основною функцією вартових агентів є сповіщення свого власника (користувача) про факт виявлення порушника та подальше інформування про його переміщення. При цьому передбачається, що існує деякий віддалений центр (консоль управління), який користується інформацією, що надходить від вартових агентів. Стосовно порушників передбачається, що вони є рухомими, і їх загальна кількість не обмежується одним.

Таблиця 5.1.

Об'єкти концептуальної моделі процесу виявлення та відстеження порушників.

№	Позначення	Об'єкт концептуальної моделі	Характеристики об'єкту
1	I	Порушник (intruder) - цільовий ("небажаний") об'єкт, об'єкт спостереження	тип порушника; тактика дій порушника; траєкторія руху порушника в E; кількість порушників; кількісний розподіл порушників по типах
2	E	Територія, що підлягає охороні (зона виявлення та відстеження порушників, зона спостереження)	граничі території; територія з фіксованими (незмінними у часі) чи змінними границями (граничі території динамічно змінюються); площа території; "геометричні" характеристики території
3	S	Система виявлення та відстеження порушників (СВВП)	централізована чи децентралізована; автономна чи під управління людини-оператора; масштаб системи; стаціонарна чи тимчасово розгорнута
4	M	Користувач (власник) системи (центр збору та обробки, консоль управління системою)	кількість консолей управління; статична/мобільна консоль управління; розташування консолей (в межах зони E, чи поза межами зони E)

5	А	Вартовий агент	тип вартового агента; тип сенсорної системи вартового агента; тип підсистеми переміщення вартового агента (статичний/мобільний, "тип мобільності"); радіус виявлення порушника сенсорною системою; радіус дії засобів зв'язку; початковий запас енергії
6	К	Колектив вартових агентів	загальна кількість вартових агентів у колективі; кількісний розподіл вартових агентів по різних типах; спосіб інформаційної взаємодії вартових агентів
7	С	Система передачі даних (сповіщення) та інформаційної взаємодії вартових агентів	тип системи (електромагнітна, оптична, акустична); пропускна здатність системи; функція витрат енергії на роботу системи

Таким чином до основних задач СВВП відносяться [113-114]:

1. Виявлення порушника: 1.1) виявлення факту вторгнення деякого об'єкту в зону Е; 1.2) розпізнавання цього об'єкту як порушника; 1.3) повідомлення користувача (власника) системи про факт виявлення порушника.

2. Відстеження порушника (спостереження за пересуваннями порушника у зоні Е): 2.1) встановлення біжучого місця розташування порушника в зоні Е; 2.2) встановлення напрямку та швидкості руху порушника (параметрів траєкторії руху порушника); 2.3) періодичне повідомлення користувача системи про місце розташування порушника в зоні Е та про параметри траєкторії його руху.

Крім цього перед СВВП стоїть низка додаткових задач, зокрема: 1) приховування факту роботи системи від порушників, 2) протидія деструктивним втручанням порушників у роботу системи, 3) подовження часу роботи СВВП (збереження та поповнення запасів енергії) та ін.

Одним з основних недоліків більшості сучасних СВВП є те, що вони працюють під контролем людини-оператора, тобто людина є «ключовим елементом» і одночасно «слабкою ланкою» в таких системах. Іншим недоліком сучасних СВВП можна вважати те, що вони в переважній більшості мають централізовану архітектуру. Відповідно вивід з ладу центра управління такої системи призводить до значного погіршення її роботи або взагалі повного припинення роботи усієї системи. Крім цього, на даний час СВВП, як правило, запрограмовані на виявлення лише певних, заздалегідь відомих розробникам таких систем видів загроз (наприклад, з точки зору виявлення порушників – це

певні способи подолання порушником підконтрольної зони). Відповідно в разі виникнення нових («невідомих» для СВВП) типів поведінки порушників, останні не будуть виявлятися системою.

Вибір технології багатоагентних систем для побудови СВВП зумовлений метою, по-перше, зробити цю систему автономною, тобто здатною виконувати свої функції самостійно без втручання людини-оператора, та, по-друге, адаптивною, тобто здатною виявляти нові типи поведінки порушників та шукати найкращі за низкою обраних критеріїв способи виявлення та відстеження за цих умов. Крім цього за рахунок децентралізації управління в такій системі досягається надвисока надійність її роботи. За рахунок відсутності центра управління автономна система спостереження відрізняється надвисокою надійністю. Вона продовжує працювати доти, доки хоча б один агент залишається в робочому стані.

Для досягнення зазначеної мети доцільно використати концепцію самоорганізації багатоагентної системи виявлення та відстеження порушників [113]. В рамках цієї концепції передбачено, що за рахунок набуття досвіду (самонавчання) та проведення натурних експериментів (планування, організація, аналіз результатів) по вивченню різних аспектів поведінки порушників автономна адаптивна СВВП буде здатна цілеспрямовано реагувати на зміни 1) «поведінки» об'єктів спостереження (порушників); 2) мети (цільової функції) роботи системи (з боку користувача); 3) зовнішніх умов виявлення та відстеження порушників.

При цьому з точки зору надійності та якості роботи автономної адаптивної СВВП треба окремо вказати на проблему нестачі інформації про кількість та тактику дій (переміщень) потенційних порушників. Специфіка ситуації полягає в тому, що порушник максимально зацікавлений в тому, щоб залишитись непоміченим для системи спостереження (тут можна вказати на аналогічні міркування про взаємини гравців в рамках математичної теорії ігор). Спираючись на це, можна припустити, що передбачити наперед всі можливі способи вторгнення та подолання порушником (або групою порушників) території, яка охороняється, неможливо. Саме тому ми пропонуємо використати технологію

багатоагентних систем, яка, крім усього іншого, містить методи автономного цілеспрямованого подолання нестачі інформації про об'єкт спостереження та управління (яким в даному випадку є порушник). Таким чином основним «предметом» (рушієм) самоорганізації колективу вартових агентів є тактика дій порушників та зміни в оточуючому середовищі, в якому відбувається виявлення та відстеження переміщень цих порушників (наприклад, тимчасове різке погіршення якості радіозв'язку між вартовими агентами). Іншими словами, передбачається, що колектив вартових агентів буде здатний на основі вивчення свого супротивника та середовища знаходити найбільш ефективні за деякою системою критеріїв способи виявлення та відстеження порушників, реалізуючи тим самим логіку роботи методів організації адаптивних ВО-процесів.

Для вирішення задачі колективного відстеження траєкторії руху порушника можна запропонувати наступний підхід на основі використання нерухомих вартових агентів. У разі вторгнення порушника в зону охорони вартові агенти самостійно формують навколо нього «коло супроводу» певної форми (рис. 5.3). Ця форма залежить від розміщення тих вартових агентів, які виявили порушника. При цьому в процесі пересування порушника в межах охоронної зони «коло супроводу» рухається разом з ним за рахунок спільних узгоджених дій вартових агентів щодо «ланцюжкової» активації наступних учасників «кола супроводу» (в такий спосіб «коло супроводу» пересувається в той час як агенти залишаються нерухомими).

В якості можливих шляхів вирішення проблеми ефективного управління енергоспоживанням СВВП розглянемо наступні пропозиції. З метою економії енергії в ситуаціях, коли виникає необхідність сповістити користувача про виявленого порушника, можна запропонувати використовувати режим «самопожертви» агента, по аналогії із самопожертвою бджоли, яка жалить (передбачається, що порушник здатний виявляти джерела радіохвиль і знищувати їх, відповідно агент, який виходить на зв'язок ризикує бути знищеним). Такий агент обирається, наприклад, шляхом жеребкування з підмножини тих агентів, що приймали участь у виявленні порушника. При цьому агент, що переходить в

режим «самопожертви», переключається в режим віддаленого радіозв'язку з користувачем. Всі інші агенти працюють в енергозберігаючому режимі з обмеженим радіусом зв'язку. Режим «самопожертви» агента доцільно також використовувати в ситуації, коли витрати енергії на відправку повідомлення про порушника дорівнюють біжучому запасу енергоресурсів кожного з агентів (наприклад, після тривалого терміну їх автономної роботи). В цій ситуації «самопожертва» агента полягає в тому, що після відправки повідомлення він припиняє свою роботу внаслідок вичерпання власного енергоресурсу.

Значної економії енергоресурсів можна досягти за рахунок використання в роботі вартового агента режиму резервного очікування (standby mode). В цьому режимі відбувається тимчасове відключення у агента деякої обмеженої кількості енерговитратних сенсорів (наприклад, двох із трьох сенсорів: акустичного та сейсмічного, залишивши працювати інфрачервоний). Останній при появі інформації про підозрілий об'єкт «будить» інші сенсори, що забезпечує більш об'єктивну оцінку ситуації, що склалася.

Економію енергії можна досягнути також шляхом розподілу усіх агентів на «пасіонарних» (тобто тих, що розташовані по периметру території, що охороняється) та «субпасіонарних» (тобто тих, що розташовані всередині цієї території) (рис.5.4). При цьому «пасіонарні» агенти, які виступають першою лінією охорони, споживають більше енергії, на відміну від «субпасіонарних», які в цей час можуть знаходитись в режимі резервного очікування. В рамках цього підходу для підвищення надійності роботи СВВП можна використовувати декілька ліній охорони.

Переключення окремого вартового агента в режим «пасіонарного» відбувається у випадку припинення роботи інших агентів внаслідок втрачання ними запасів енергії або внаслідок пошкодження цих агентів порушником (рис. 5.5). При цьому першими вичерпають свій енергоресурс вартові агенти першої лінії охорони, після чого їх роль почнуть перебирати на себе інші вартові агенти (рис. 5.5).

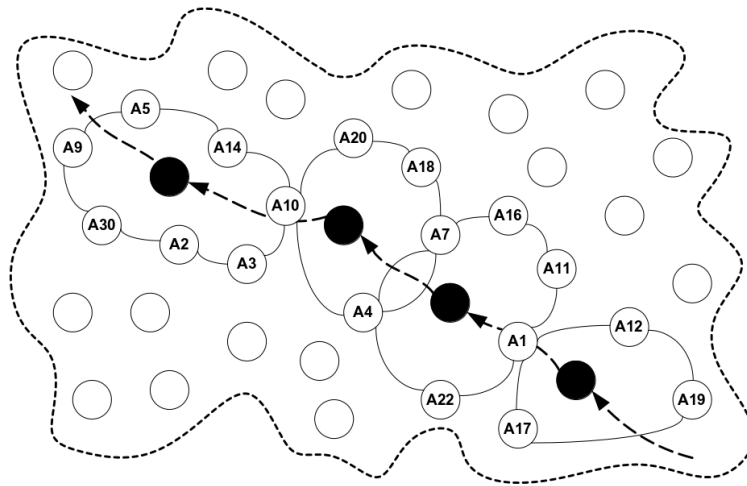


Рис. 5.3. Колективні дії вартових агентів по супроводженню порушника

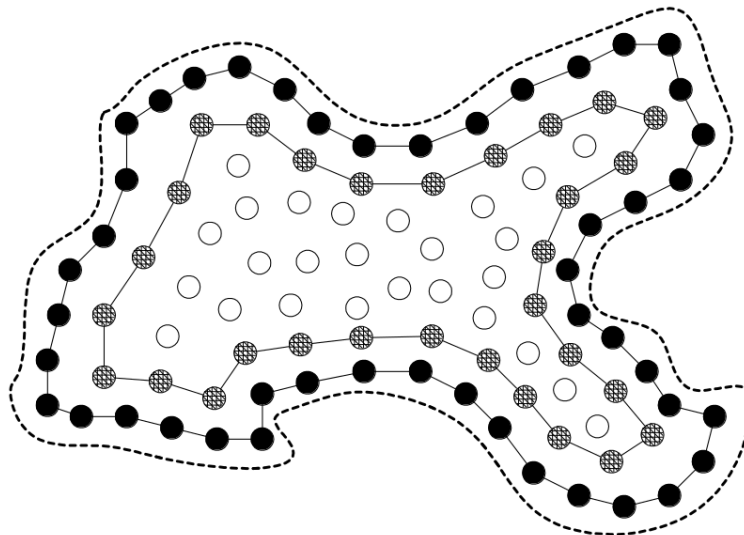


Рис. 5.4. Приклад дворівневої лінії охорони

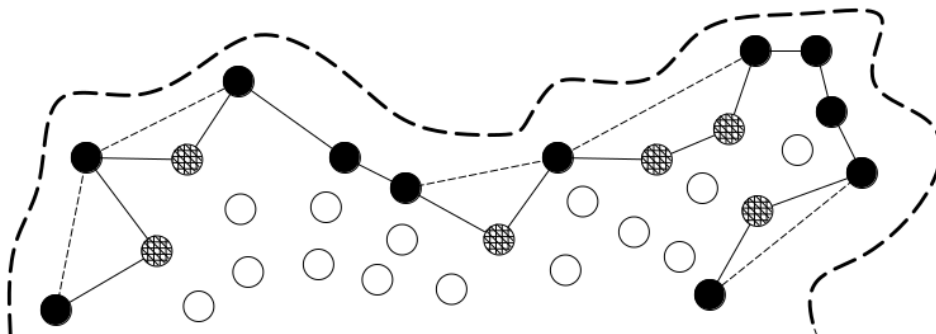


Рис. 5.5. Приклад переключення ліній охорони

Розроблений прототип СВВП складається з наступних основних компонентів: сенсорні вузли, вузли управління, виконавчі вузли, консолі управління та середовище передачі даних (рис. 5.6, 5.7). 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 (рис. 5.8, 5.9, 5.10); 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.

5.3. Автономна децентралізована система моніторингу комп'ютерної мережі на основі програмних агентів

5.3.1. Структура автономної децентралізованої системи моніторингу комп'ютерної мережі

Автономна децентралізована система моніторингу комп'ютерної мережі на основі програмних агентів 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. Забезпечено залежність роботи програмних агентів від різних класів інформації, що цікавить користувача (наприклад, інформації з

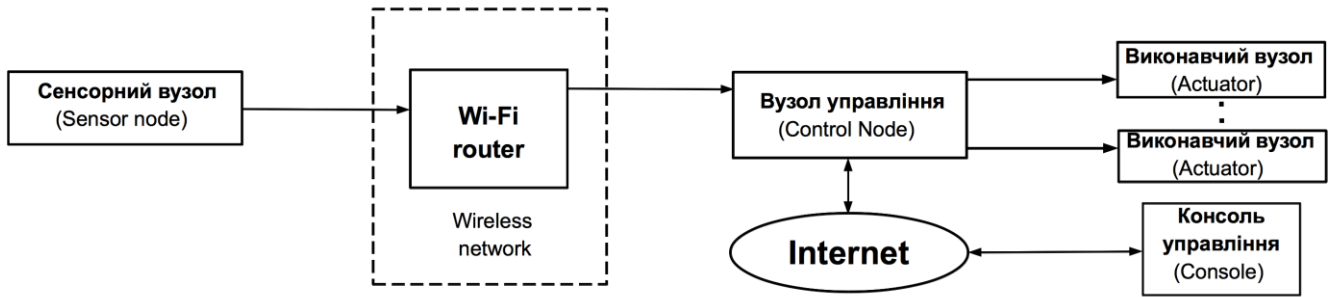


Рис. 5.6. Загальна структурна схема СВВП

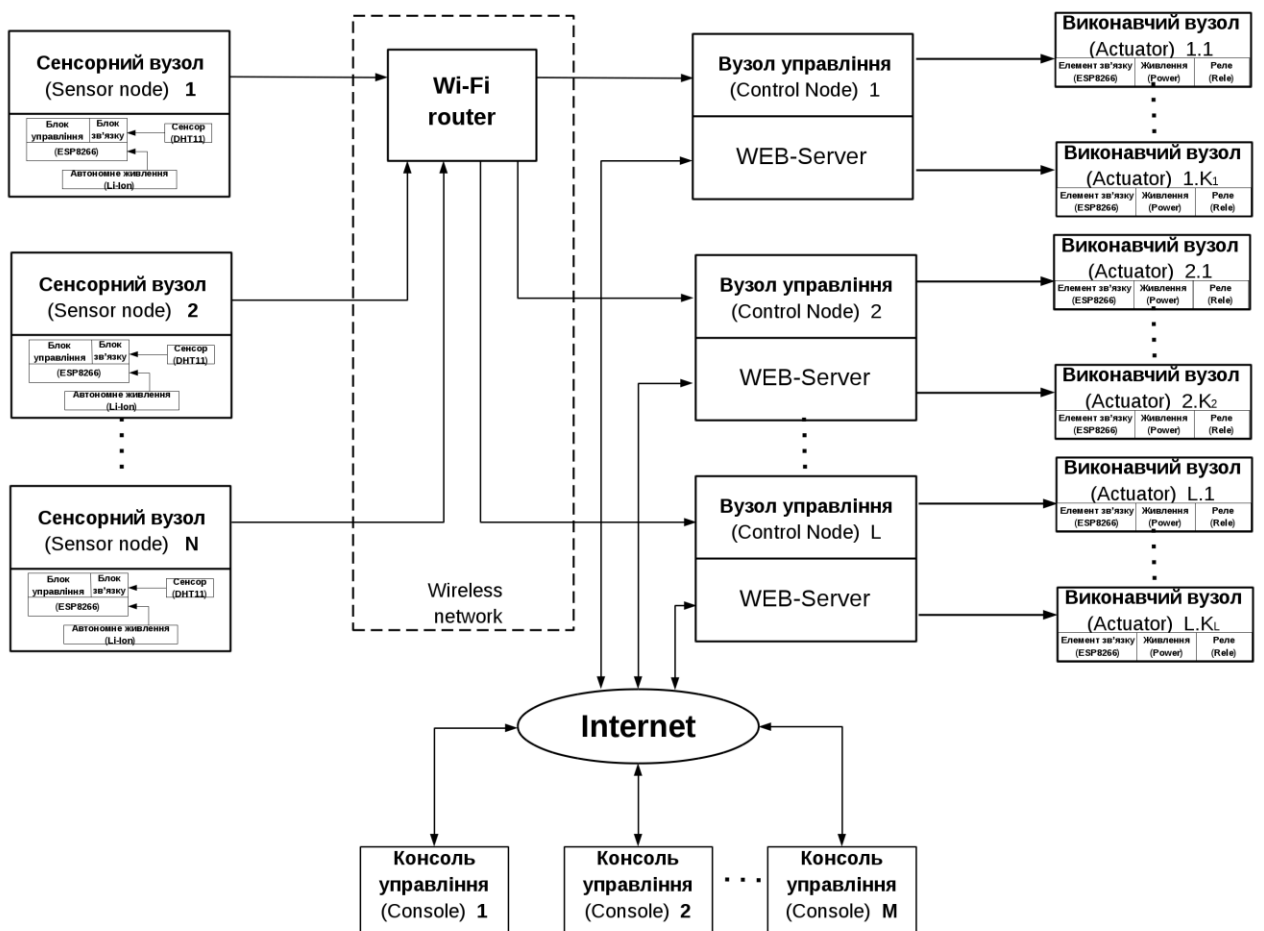


Рис. 5.7. Розгорнута структурна схема СВВП

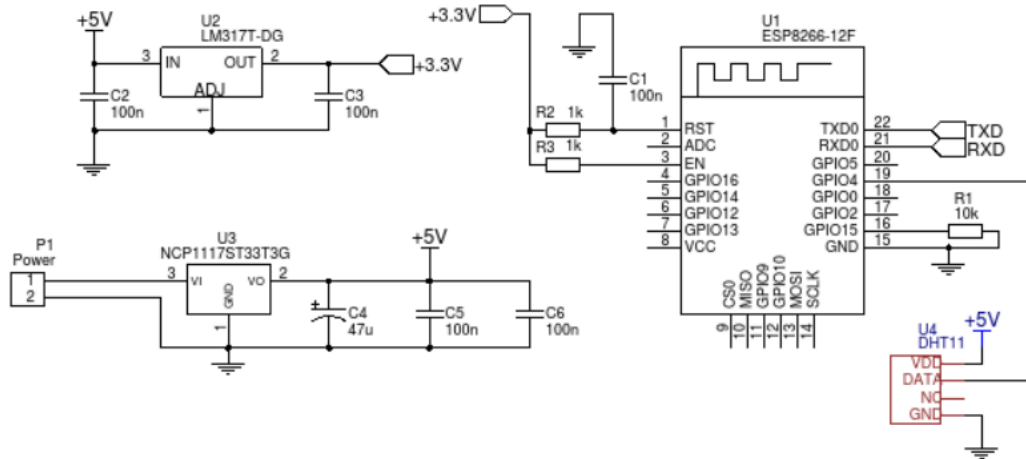


Рис. 5.8. Функціональна схема сенсорного вузла прототипу СВВП

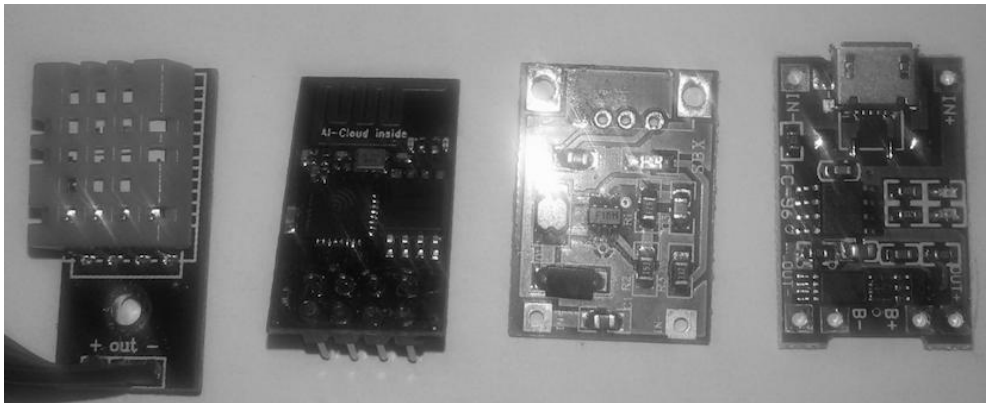


Рис. 5.9. Комплектуючі сенсорного вузла прототипу СВВП



Рис. 5.10. Конструкція сенсорного вузла прототипу СВВП

різних рівнів OSI: Ethernet, IP, Application level, тощо). Програмний агент (рис. 5.11) – це уніфікована програма, яка встановлюється локально на мережевому вузлі. Після встановлення і запуску на виконання програмного агента мережевий вузол охоплюється системою моніторингу. Завданням агента є збирання локальної інформації про вузол та мережу в рамках специфікації RMON MIB [118-121]. По вимозі іншого агента даний агент повідомляє зібрану їм інформацію, запит на яку він отримав. Кожен з агентів по вимозі користувача може тимчасово виконувати функції консолі управління системи моніторингу (надання доступу до зібраної агентами інформації та виконання команд управління). В роботі агентів системи моніторингу комп'ютерної мережі реалізовано запропоновані методи організації адаптивних ВО-процесів.

Розподілена система моніторингу комп'ютерної мережі архітектурно базується на програмній реалізації прикладного програмного інтерфейсу Simple Monitor Agent (SMA), який розроблений та реалізований у вигляді динамічної бібліотеки `smapi.dll`. Ця бібліотека дозволяє збирати статистичні дані про роботу стеку протоколів TCP/IP. Дані зберігаються в локальній базі даних керуючої інформації (MIB). Для заповнення і керування MIB використано програмні бібліотеки `snmpapi.dll` та `iphlpapi.dll`. Зокрема бібліотека Internet Protocol Helper (`iphlpapi.dll`) використовується для програм, які реалізують функції мережного адміністрування локальної комп'ютерної мережі та комп'ютерів, що до неї входять. Використовуючи цю бібліотеку можна програмно забрати інформацію про конфігурацію мережі локального комп'ютера, і також змінювати цю конфігурацію. Для побудови підпрограми пошуку даних в MIB використовуються функції бібліотеки `snmpapi.dll`.

На основі прикладного програмного інтерфейсу SMA розроблено SNMP-агента системи моніторингу комп'ютерної мережі. Для цього також використано функції стандартної бібліотеки `snmpapi.dll`, для того щоб розроблений SNMP-агент міг відсилати і приймати SNMP-повідомлення. Взаємодія SNMP-агента з менеджером системи моніторингу відбувається за допомогою системного сервісу

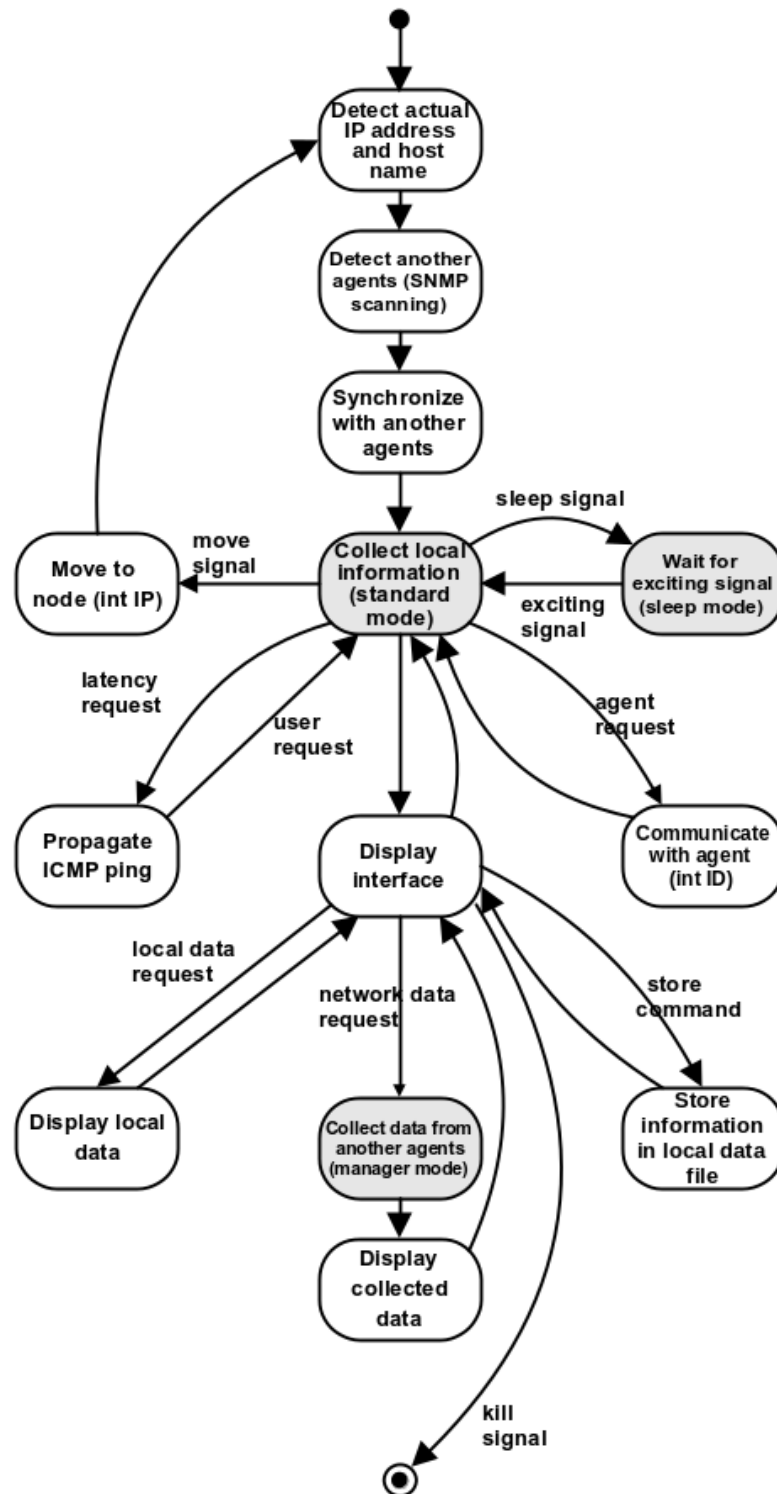


Рис. 5.11. Схема роботи розробленого програмного агента

SNMP. Відповідно розроблений SNMP-агент може бути використаний на будь якій Windows-платформі. На рис. 5.12 показана взаємодія бібліотек, які використовуються SNMP-агентом. Менеджер системи моніторингу комп'ютерної мережі побудований на основі бібліотеки WinSNMP API – прикладного програмного інтерфейсу для розробки SNMP-сумісних програм.

Програма SNMP-агента реалізована на мові програмування ANSCI C, з огляду на те, що він виконується на рівні системних програм, внаслідок чого необхідна висока швидкодія його роботи. Менеджер системи моніторингу комп'ютерної мережі розроблено за допомогою системи швидкої розробки MS Visual Basic, оскільки основним завданням при його розробці було створення графічного інтерфейсу користувача для відображення інформації отриманої від SNMP-агентів. В табл. 5.2. міститься додаткова інформація про розробленні компоненти системи моніторингу.

Таблиця 5.2.

Використані бібліотеки, мови розробки та типи вихідних файлів розробленої системи моніторингу

Компонента	Мова програмування	Тип вихідного файлу	Використані бібліотеки
SMA API	ANSI C	Dll	Snmpapi.dll Iphlapi.dll
Agent	ANSI C	Dll	Smapi.dll Snmpapi.dll
Manager	Visual Basic	Exe	Wsnmp32.dll

5.3.2. Прикладний програмний інтерфейс Simple Monitor Agent

Прикладний програмний інтерфейс Simple Monitor Agent (smapi.dll) побудовано за допомогою засобів Microsoft Visual C++. Ця динамічна бібліотека зчитує статистичні дані стеку протоколів TCP/IP і зберігає їх в своїй локальній базі керуючих даних (MIB). Доступ до цих даних здійснюється за допомогою двох функцій, які експортуються даною бібліотекою: Set_OidPrefix (встановлює префікс ідентифікатора об'єкта) і функції ResolveVarBind (здійснює доступ до

конкретного об'єкта бази даних). На рис. 5.13. зображена структура програми, яка реалізує розроблений прикладний програмний інтерфейс Simple Monitor Agent.

База керуючих даних (MIB) представляє собою структуру MIB_ENTRY:

```
typedef struct mib_entry {
    AsnObjectIdentifier Oid;
    void * Storage;
    BYTE Type;
    UINT Access;
    UINT (*MibFunc)(UINT, struct mib_entry *, RFC1157VarBind * );
    struct mib_entry * MibNext;
} MIB_ENTRY;
```

де Oid – ідентифікатор об'єкта; Storage – покажчик на змінну в якій зберігаються дані; Type – тип змінної; Access – тип доступу до змінної (читання, читання-запис); MibFunc – покажчик на функцію яка модифікує або читає дані змінної, на яку вказує покажчик цієї структури; MibNext – покажчик на наступну структуру.

Функція ResolveVarBind здійснює доступ до конкретного об'єкта бази даних:

```
__declspec(dllexport) UINT ResolveVarBind(
    IN OUT RFC1157VarBind *VarBind,
    IN UINT PduAction
)
```

де *VarBind – покажчик на структуру RFC1157VarBind, PduAction – це тип команди. Ця функція на першому етапі виконання SNMP-агента поновлює базу даних за допомогою функції Get_MIB, а потім в циклі while шукає в базі даних ідентифікатор об'єкта, який переданий в якості параметра функції. Пошук проводиться за допомогою функції SnmpUtilOidCmp:

```
CompResult = SnmpUtilOidCmp( &VarBind->name, &TempOid );
```

Ця функція порівнює ідентифікатор переданий функції ResolveVarBind з ідентифікаторами які знаходяться в базі даних. Якщо результат порівняння менший нуля (CompResult<0) і тип команди не дорівнює MIB_ACTION_GETNEXT, тоді функція повертає результат SNMP_ERRORSTATUS_NOSUCHNAME, який говорить про те, що даної змінної в базі даних немає. У випадку, коли тип команди є MIB_ACTION_GETNEXT, покажчику MibPtr присвоюється адреса першого елемента структури MIB_ENTRY і встановлюється тип команди MIB_ACTION_GET, потім

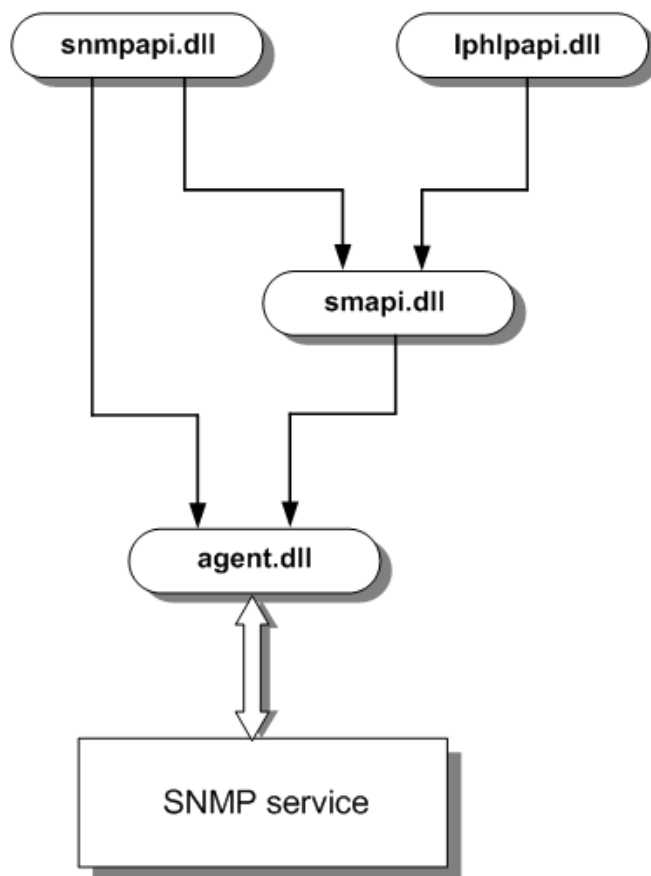


Рис. 5.12. Взаємодія бібліотек, які використовуються SNMP-агентом

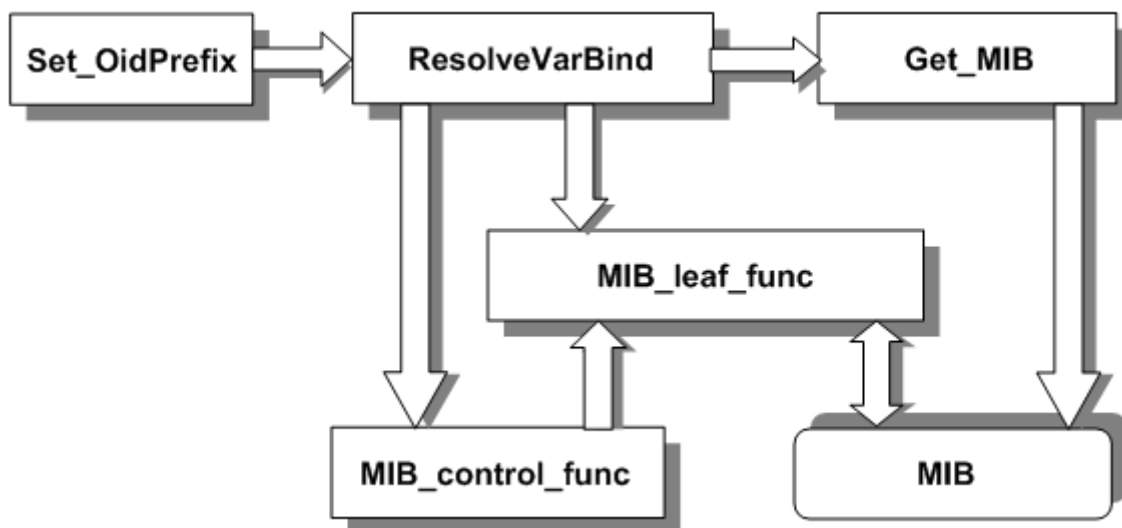


Рис. 5.13. Структура розробленого прикладного програмного інтерфейсу Simple Monitor Agent (smapi.dll)

викликається функція, на яку вказує покажчик *MibFunc структури MIB_ENTRY:

```
nResult = (*MibPtr->MibFunc)( PduAction, MibPtr, VarBind );
```

Якщо результат порівняння ідентифікаторів дорівнює нулю (CompResult = 0), це означає, що ця змінна присутня в базі даних, і тоді покажчику MibPtr присвоюється адрес біжучого елемента структури MIB_ENTRY і викликається функція на яку показує покажчик *MibFunc структури MIB_ENTRY. В ситуації коли результат порівняння більший нуля (CompResult>0) змінна *i* збільшується на одиницю. Вихід із циклу відбувається при умові:

```
while( MibPtr == NULL && I < MIB_num_variables )
```

де MIB_num_variables – це кількість елементів структури MIB_ENTRY.

Функція MIB_leaf_func:

```
UINT MIB_leaf_func(
    IN UINT Action,
    IN MIB_ENTRY *MibPtr,
    IN RFC1157VarBind *VarBind
)
```

де Action – тип команди, MibPtr – покажчик на структуру MIB_ENTRY, VarBind – покажчик на структуру RFC1157VarBind. В цій функції безпосередньо модифікуються або зчитуються дані із змінних, на які вказують покажчики Storage структури MIB_ENTRY. Функція працює наступним чином. За допомогою оператора switch case визначається який тип команди містить параметр функції Action. Якщо Action дорівнює MIB_ACTION_GETNEXT, то 1) перевіряється чи існує наступний елемент структури:

```
if ( MibPtr->MibNext == NULL )
{
    ErrStat = SNMP_ERRORSTATUS_NOSUCHNAME;
    goto Exit;
}
```

і 2) викликається функція, на яку вказує покажчик MibFunc наступного елемента структури MIB_ENTRY з наступними параметрами:

```
ErrStat = (*MibPtr->MibNext->MibFunc)( MIB_ACTION_GET,
    MibPtr->MibNext, VarBind );
```

Якщо Action дорівнює MIB_ACTION_GET, то перевіряється тип доступу:

```
if ( MibPtr->Access != MIB_ACCESS_READ &&
    MibPtr->Access != MIB_ACCESS_READWRITE )
{
    ErrStat = SNMP_ERRORSTATUS_NOSUCHNAME;
```



```

        goto Exit;
    }

```

і в структуру `VarBind` записується значення змінної, на яку вказує покажчик `Storage` структури `MIB_ENTRY`:

```

VarBind->value.asnType = MibPtr->Type;
VarBind->value.asnValue.number = *(AsnInteger *) (MibPtr->Storage);

```

Якщо `Action` дорівнює `MIB_ACTION_SET`, то 1) перевіряється тип доступу:

```

if ( MibPtr->Access != MIB_ACCESS_READWRITE &&
    MibPtr->Access != MIB_ACCESS_WRITE )
{
    ErrStat = SNMP_ERRORSTATUS_NOSUCHNAME;
    goto Exit;
}

```

після чого 2) відбувається перевірка типу змінної:

```

if ( MibPtr->Type != VarBind->value.asnType )
{
    ErrStat = SNMP_ERRORSTATUS_BADVALUE;
    goto Exit;
}

```

та запис даних в `MIB`:

```

*(AsnInteger *) (MibPtr->Storage) = VarBind->value.asnValue.number;

```

Функція `MIB_control_func` виконує додатковий контроль для типу команди `MIB_ACTION_SET`. При цьому перевіряється значення змінної, яка має записуватися в `MIB`:

```

if ( MIB_TOASTER_UP > VarBind->value.asnValue.number ||
    MIB_TOASTER_DOWN < VarBind->value.asnValue.number )
{
    ErrStat = SNMP_ERRORSTATUS_BADVALUE;
    goto Exit;
}

```

В наведеному вище фрагменті програмного коду також виконується перевірка: чи відповідає значення змінної `VarBind->value.asnValue.number` заданому діапазону значень.

Функція `Get_MIB` зчитує статистичні дані стеку протоколів TCP/IP за допомогою таких функцій:

1. `GetIpStatistics` – отримання статистичних даних протоколу IP;
2. `GetTcpStatistics` – отримання статистичних даних протоколу TCP;
3. `GetUdpStatistics` – отримання статистичних даних протоколу UDP;
4. `GetIfEntry` – отримання статистичних даних інтерфейсного рівня.

Для того, щоб ці функції були доступні програмі SNMP-агента спочатку завантажується в пам'ять бібліотека `iphlpapi.dll` платформи SDK, і визначаються

адреси пам'яті, за якими розміщені ці функції. Завантаження бібліотеки виконується за допомогою функції `LoadLibrary`, а адреси пам'яті визначаються за допомогою функції `GetProcAddress` :

```
hDLL=LoadLibrary("iphlpapi.dll");
lpGetIfEntry = (LPFNDLLFUNC1)GetProcAddress(hDLL, "GetIfEntry");
lpGetIpStatistics = (LPFNDLLFUNC2)GetProcAddress(hDLL, "GetIpStatistics");
lpGetTcpStatistics =
(LPFNDLLFUNC3)GetProcAddress(hDLL, "GetTcpStatistics");
lpGetUdpStatistics = (LPFNDLLFUNC4)GetProcAddress(hDLL, "GetUdpStatistics");
```

5.3.3. Агент системи моніторингу локальної мережі

Агент системи моніторингу локальної мережі побудовано також за допомогою засобів Microsoft Visual C++. SNMP повідомлення агент одержує та надсилає за допомогою стандартного сервісу SNMP. Для цього в програмній реалізації агента використовуються наступні функції:

- BOOL WINAPI DllMain;
- BOOL WINAPI SnmpExtensionInit;
- BOOL WINAPI SnmpExtensionTrap;
- BOOL WINAPI SnmpExtensionQuery.

Функція `SnmpExtensionInit` реєструє в сервісі SNMP префікс ідентифікаторів об'єктів бази керуючої інформації MIB. Функція `SnmpExtensionQuery` отримує і відсилає SNMP-повідомлення. На рис. 5.14. наведена структура взаємодії агента (`smagent.dll`) з сервісом SNMP.

Коли надходить SNMP повідомлення з мережі, SNMP-service перевіряє в своїй базі даних префіксів-ідентифікаторів об'єктів MIB, чи за префіксом, що містить SNMP повідомлення, зареєстрований агент. Якщо префікс SNMP повідомлення відповідає префіксу за яким агент зареєстрований, викликається функція `SnmpExtensionQuery` даного агента.

В функції `SnmpExtensionQuery` викликається раніше розроблена функція `ResolveVarBind`, яка виконує обробку надісланого SNMP-повідомлення.

5.3.4. Менеджер системи моніторингу

Менеджера системи моніторингу створено за допомогою засобів MS Visual Basic. Проект містить п'ять форм і один програмний модуль. Взаємодія менеджера з протоколом SNMP відбувається за допомогою функцій стандартної бібліотеки `wsnmp32.dll`. Всі функції цієї бібліотеки, які використовує менеджер, задекларовані в модулі `wsnmp32.bas`. Також в цьому модулі описані типи змінних, які використовує протокол SNMP і необхідні глобальні константи. На рис. 5.15. зображено структуру взаємодії форм менеджера системи моніторингу.

У файлі проекту `manager.vbp` описано загальні властивості проекту. Наприклад, тип створюваного виконавчого файлу (`Type=Exe`), список компонентів ActiveX, які було застосовано у проекті, список форм проекту (`Form=Queries_F.frm`), відомості про назву проекту (`Title="manager"`), форма або процедура, з якої слід починати виконання проекту та ін.

Форма `SMAForm.frm` реалізує основне стартове вікно програми-менеджера, з якого відбувається виклик всіх інших вікон. Форма `SMAForm.frm` – це форма типу MDI, яка дозволяє створити контейнер для певної кількості інших форм типу MDI Child. В формі `ManagerForm` (рис. 5.16) відображаються головні події процесу моніторингу локальної мережі. Під час завантаження цієї форми, тобто в процедурі `Loadform`, ініціалізується сесія SNMP. Ініціалізація сесії SNMP виконується за допомогою функції `SnmCreateSession` з бібліотеки `wsnmp32.dll`:

```
hSession = SnmpCreateSession(txSnmListen.hWnd, WM_CHAR, 0, 0)
```

В цій функції в якості аргументу «прив'язується» процедура `txSnmListen_KeyPress`, яка викликається в момент надходження SNMP-повідомлень. Формування і надсилання SNMP-повідомлень виконує розроблена процедура `SendRequest`. SNMP-повідомлення містить наступні складові: версія повідомлення, контекст (пароль доступу до агента), ідентифікатор об'єкта MIB, поле даних і тип даних, тип команди, статус помилки.

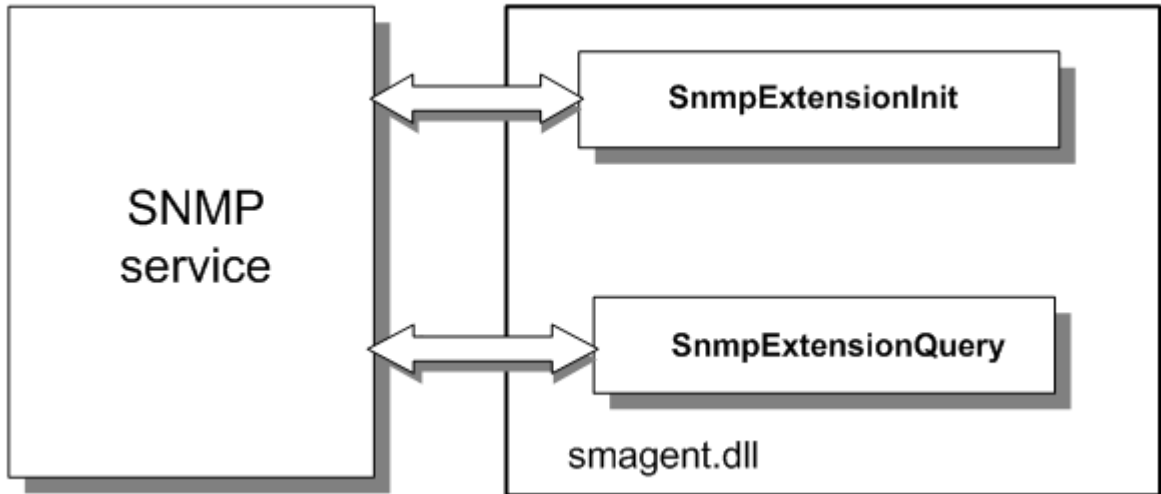


Рис. 5.14 Схема взаємодії агента (smagent.dll) з сервісом SNMP

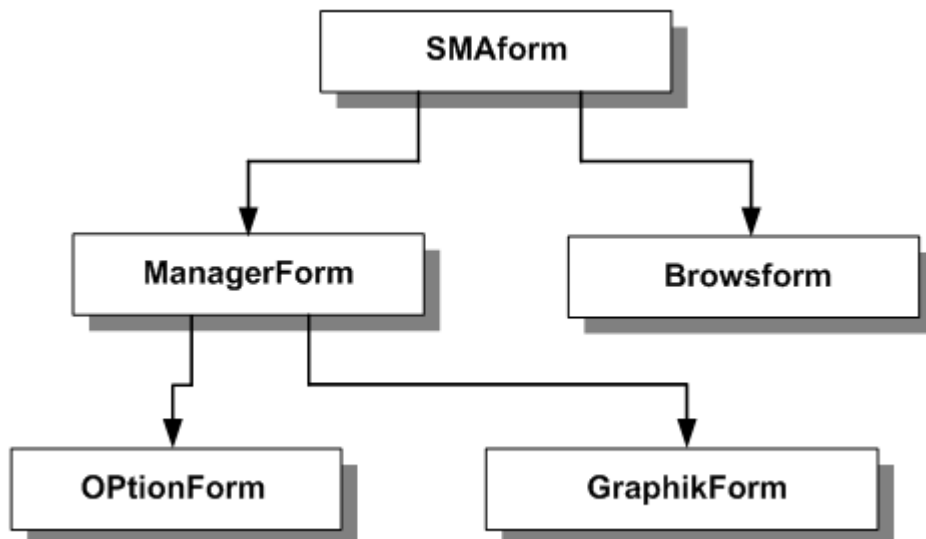


Рис. 5.15. Схема взаємодії форм менеджера системи моніторингу

За допомогою функцій бібліотеки `wsnmp32.dll` створюється і надсилається в мережу наступне SNMP-повідомлення:

```
Result = SnmpSetTranslateMode(SNMPAPI_TRANSLATED)
srcEntity = SnmpStrToEntity(hSession, txSource)
...
Result = SnmpSetTranslateMode(SNMPAPI_UNTRANSLATED_V1)
srcEntity = SnmpStrToEntity(hSession, txSource)
...
Result = SnmpSetTranslateMode(SNMPAPI_TRANSLATED)
dstEntity = SnmpStrToEntity(hSession, txDest)
...
Result = SnmpSetTranslateMode(SNMPAPI_UNTRANSLATED_V1)
dstEntity = SnmpStrToEntity(hSession, txDest)
...
NullValue.syntax = SNMP_SYNTAX_NULL
contextOct.len = Len(txContext.Text)
contextOct.ptr = txContext
Result = SnmpSetTranslateMode(SNMPAPI_TRANSLATED)
context = SnmpStrToContext(hSession, contextOct)
...
Result = SnmpStrToOid(txOid, getOid)
vbl = SnmpCreateVbl(hSession, getOid, NullValue)
pdu = SnmpCreatePdu(hSession, SNMP_PDU_GET, 1234, 0, 0, vbl)
Result = SnmpSendMsg(hSession, srcEntity, dstEntity, context, pdu)
```

Функція `SnmpStrToEntity` перетворює представлений в текстовому форматі IP-адрес і контекст в формат SNMP-повідомлення. Таким самим чином працює функція `SnmpStrToOid`, яка перетворює ідентифікатор об'єкта MIB в формат SNMP-повідомлення. Функція `SnmpCreateVbl` створює зв'язний список даних, куди входять ідентифікатор об'єкта MIB, тип даних і самі дані. Функція `SnmpCreatePdu` створює і ініціює елемент даних протоколу (PDU) SNMP. За допомогою функції `SnmpSendMsg` SNMP-повідомлення надсилається агенту системи моніторингу (в цій функції необхідно вказати IP-адресу менеджера і IP-адресу агента).

Для аналізу SNMP-повідомлень отриманих від агента розроблено функцію `RecvMsg`, в якій за допомогою `SnmpRecvMsg` отримується SNMP-повідомлення, надіслане агентом за допомогою `SnmpSendMsg`:

```
Result = SnmpRecvMsg(hSession, srcEntity, dstEntity, context, pdu)
Result = SnmpGetPduData(pdu, pduType, ReqID, errStat, errInd, vbl)
Result = SnmpGetVb(vbl, 1, getOid, getValue)
```

Функція `SnmpGetPduData` повертає вибрані поля даних елементу даних протоколу SNMP. Функція `SnmpGetVb` вибирає інформацію із змінного списку

даних. Отримана інформація з SNMP-повідомлення виводиться в TextBox форми ManagerForm:

```
Select Case txAgentSource.Text
    Case txDest1
        Text6.Text = getValue.octetv.len
        Semaforr1 = 1
        Error_Meseg1 = 0
        TimeRec = Time$
        ...
    Case txDest5
        Text10.Text = getValue.octetv.len
        Semaforr5 = 1
        Error_Meseg5 = 0
End Select
```

В наведеному фрагменті програми також перевіряється від якого агента одержано інформацію.

Генерування SNMP-запитів відбувається за допомогою програмної компоненти Timer. Ця компонента через вказаний проміжок часу викликає відповідну процедуру обробки події. В нашому випадку ця процедура має назву Timer1_Timer. Ця процедура в свою чергу викликає процедуру SendRequest, яка формує і надсилає SNMP-запити агентам системи моніторингу. Отриманні SNMP-повідомлення від агентів передаються процедурі txSnmplisten_KeyPress, якій також передаються повідомлення про втрачені SNMP-повідомлення. Процедура txSnmplisten_KeyPress для обробки отриманих SNMP-повідомлень викликає процедуру RecvMsg, що описана вище.

Форма OptionForm (рис. 5.17) призначена для введення таких параметрів, як IP-адреса менеджера системи моніторингу, пароль доступу до менеджера (Context), ідентифікатор об'єкта MIB (OID Monitoring), максимально допустиме значення змінної, за якою ведеться постійне спостереження (Max value), назва ідентифікатора об'єкта MIB, проміжок часу через який надсилаються відповідні SNMP-запити до агентів системи моніторингу. Форма GraphikForm (рис. 5.18) відображає у вигляді графіка зміну значення об'єкта бази керуючої інформації MIB у часі. Форма BrowserForm (рис. 5.19) призначена для перегляду значень об'єктів бази керуючої інформації MIB. Для цього використовуються аналогічні процедури надсилання, отримання та обробки SNMP-повідомлень, що і в реалізації форми ManagerForm.



Рис. 5.16. Зовнішній вигляд форми ManagerForm (на формі показано, що менеджер системи моніторингу встановив зв'язок з 5-ма агентами)

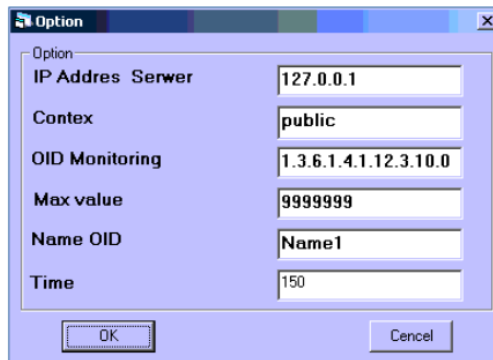


Рис. 5.17. Зовнішній вигляд форми OptionForm

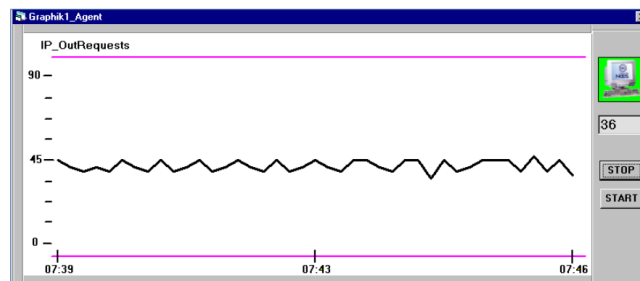


Рис. 5.18. Зовнішній вигляд форми GraphikForm

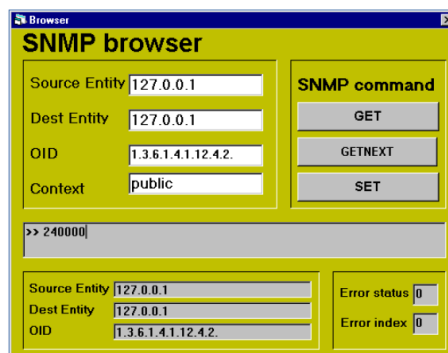


Рис. 5.19. Зовнішній вигляд форми BrowserForm

Висновки до розділу 5

1. Розглянуто реалізацію методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах. Розроблено автономну розподілену систему моніторингу навколишнього середовища на основі інтелектуальних агентів з використанням запропонованих методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів. Розроблено структуру автономного інтелектуального агента системи моніторингу навколишнього середовища. Розроблено структуру бортової системи первинної обробки даних та керування давачами інтелектуального агента системи моніторингу навколишнього середовища.

2. Розроблено автономну розподілену систему виявлення та відстеження порушників на основі бездротової сенсорної мережі з використанням методів організації адаптивних ВО-процесів та технології багатоагентних систем. Система 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. Розроблено структуру автономної розподіленої системи виявлення та відстеження порушників та прототипи її сенсорних і виконавчих вузлів.

3. Розроблено автономну децентралізовану систему моніторингу комп'ютерної мережі, яка складається з колективу програмних агентів, кожний з яких здатний працювати в двох режимах: збір інформації про комп'ютерну мережу; надання користувачу доступу до зібраної усіма агентами інформації та здійснення команд управління системою моніторингу. В роботі агентів системи моніторингу комп'ютерної мережі реалізовано запропоновані методи організації адаптивних вимірювально-обчислювальних 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.

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 вимірювальних агентів) та модель децентралізованого управління ВО-процесами на основі принципу зменшення ентропії (ентропійну модель колективної поведінки вимірювальних агентів).

6. 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 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence, by Gerhard Weiss (Editor), 2nd edition, The MIT Press, 2013. - 920 p.
2. Michael Wooldridge, An Introduction to MultiAgent Systems, 2nd edition, Wiley, 2009. - 484 p.
3. Eric Bonabeau, Marco Dorigo, Guy Theraulaz, Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems (Santa Fe Institute Studies on the Sciences of Complexity), Oxford University Press, 1999. – 288p.
4. Yoav Shoham, K. Leyton-Brown, Multiagent Systems Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundation. – Cambridge University Press, 2009. – 504 p.
5. Faisal Alkhateeb, Eslam Al Maghayreh, Iyad Abu Doush, Multi-agent Systems – Modeling, Control, Programming, Simulations and Applications, 2011. – 522 p.
6. Jiming Liu, Jianbing Wu, Multiagent Robotic Systems, CRC Press, 2001. – 304p.
7. Jiming Liu, Autonomous Agents and Multi-Agent Systems: Explorations in Learning, Self-Organization and Adaptive Computation, World Scientific Pub Co, 2001. – 300p.
8. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. - М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва "Наука", 1969. – 316с.
9. Варшавский В.И. Коллективное поведение автоматов. – М.: Наука, 1973. – 408с.
10. Растригин Л.А., Рипа К.К., Тарасенко Г.С. Адаптация случайного поиска. Рига, "Зинатне", 1978. - 239 с.
11. Растригин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. – М.: Советское радио, 1980. – 230с.
12. Растригин Л.А., Эренштейн Р.Х. Метод коллективного распознавания. – М.: Энергоиздат, 1981. – 80с.
13. Ивахненко О.Г., Лапа В.Г. Передбачення випадкових процесів. – К.: Наукова думка, 1969. – 420с.
14. Трухаев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределенности. М.: Наука, 1981. - 258 с.

15. Richard S. Sutton, Andrew G. Barto, Reinforcement Learning: An Introduction, 2nd Ed., A Bradford Book, 2018. - 532 p.
16. L.P. Kaelbling, Michael L. Littman, and Andrew W. Moore. Reinforcement learning: A survey. Journal of AI Research, N4, 1996. - pp.237-285
17. 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
18. 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
19. 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», № 688, 2010. - С.23-30
20. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А. Автономні розподілені системи з елементами самоорганізації: проблеми та напрямки розвитку // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі», № 745, 2012. - С.26-32
21. Botchkaryov A., Golembo V. Self-organization in autonomous distributed systems: new approaches and perspectives // Proceeding of the 6th International Conference «Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application» ACSN-2013, Lviv, Ukraine, September 16–18, 2013. - pp.94-98
22. Бочкарьов О.Ю. Колективна поведінка мобільних інтелектуальних агентів в задачах автономних розподілених досліджень // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі", № 546, 2005. – С.12-17

23. Бочкаръов О.Ю. Структурна адаптація автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі», № 688, 2010. - С.16-22
24. Бочкаръов О.Ю. Проблема організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі», № 745, 2012. - С.20-26
25. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники - Киев: Выща школа. Головное издательство, 1983.- 455 с.
26. Катъс Г.П. Автоматическое сканирование. - М.: Машиностроение, 1969. - 520с.
27. Кавалеров Г.И., Мандельштам С.М. Введение в информационную теорию измерений. – М.: Энергия, 1974. – 376с.
28. Темников Ф.Е., Афонин В.А., Дмитриев В.И. Теоретические основы информационной техники. – М.: Энергия, 1971. – 424с.
29. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 440с.
30. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента (планирование регрессионных экспериментов). – М.: Наука, 1971. – 312с.
31. Бримкулов У.Н., Круг Г.К., Саванов В.Л. Планирование экспериментов при исследовании случайных полей и процессов. – М.: Наука, 1986. – 154с.
32. Ажогин В.В., Згуровский М.З., Корбич Ю.С. Методы фильтрации и управления стохастическими процессами с распределенными параметрами. – К.: Вища школа, 1988. – 446с.
33. Dariusz Uciński, Measurement Optimization for Parameter Estimation in Distributed Systems, Technical University Press, Zielona Góra, 1999.
34. Christophe Tricaud, Optimal Mobile Sensing and Actuation Strategies In Cyber-Physical Systems, Springer, 2012. – 170 p.

35. Naomi Ehrich Leonard, Derek A. Paley, Francois Lekien, Rodolphe Sepulchre, David M. Fratantoni, Russ E. Davis, Collective Motion, Sensor Networks, and Ocean Sampling, Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 1, January 2007. – pp.48-74.
36. Naomi Ehrich Leonard, D. Paley, R. Davis, D. Fratantoni, F. Lekien and F. Zhang, Coordinated Control of an Underwater Glider Fleet in an Adaptive Ocean Sampling Field Experiment in Monterey Bay, Journal of Field Robotics, 27(6), 2010. – pp. 718–740.
37. Andreas Krause, Ram Rajagopal, Anupam Gupta, and Carlos Guestrin, Simultaneous placement and scheduling of sensors, In Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '09), Washington, DC, USA, 2009. – pp.181-192.
38. Daniel Golovin, Matthew Faulkner, and Andreas Krause, Online distributed sensor selection, In Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '10), New York, NY, USA, 2010.- pp.220-231.
39. J. Cortes, S. Martinez, T. Karatas, F. Bullo, Coverage control for mobile sensing networks, Robotics and Automation, IEEE Transactions on 20 (2), 2004. – pp. 243-255.
40. Francesco Bullo, Jorge Cortés, Adaptive and Distributed Coordination Algorithms for Mobile Sensing Networks, in Cooperative Control, Lecture Notes in Control and Information Science, Volume 309, 2005. – pp. 43-62.
41. Andrew Howard, Maja J. Mataric, Gaurav S. Sukhatme, Mobile Sensor Network Deployment using Potential Fields: A Distributed, Scalable Solution to the Area Coverage Problem, Proceedings of the 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems (DARS'02) Fukuoka, Japan, June 25-27, 2002.
42. E.K.P. Chong, C. Kreucher, and A. Hero, Partially observable Markov decision process approximations for adaptive sensing, Discrete Event Dynamic Systems, 19(3):377-422, 2009.

43. R. Mahler, Multitarget Sensor Management of Dispersed Mobile Sensors, in "Theory and algorithms for cooperative systems" (Don Grundle, Robert Murphey, Panos M Pardalos (eds.), World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004. – pp.239-310
44. Ruben Stranders, Decentralised Coordination of Information Gathering Agents, Ph.d. thesis, University Of Southampton, November 2010. – 204p.
45. Kian Hsiang Low, Multi-Robot Adaptive Exploration and Mapping for Environmental Sensing Applications, Ph.D. thesis, Carnegie Mellon University, 2009. – 180 p.
46. Roman Garnett, Learning from data streams with concept drift, Ph.D. thesis, University of Oxford, 2010. – 151 p.
47. Zhen Song, Optimal observation problems involving wireless sensor networks, Utah State University, Ph.D. Dissertation, 2007. - 204 p.
48. Ronald Mahler, Multitarget Sensor Management of Dispersed Mobile Sensors, in "Theory and algorithms for cooperative systems" (Don Grundle, Robert Murphey, Panos M Pardalos (eds.), World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004. – pp.239-310
49. Walt Truszkowski, et al. Autonomous and Autonomic Systems (with Applications to NASA Intelligent Spacecraft Operations and Exploration Systems), Springer, 2009. – 295 p.
50. Бочкаръов 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
51. Бочкаръов О.Ю. Організація адаптивних процесів збору інформації у мобільних кіберфізичних системах // Матеріали Другого наукового семінару «Кіберфізичні системи: досягнення та виклики», НУ «Львівська політехніка», Львів, 21-22 червня, 2016 (електронне видання)
52. Botchkaryov A. Autonomous mobile explorers' team: problem of self-organization // Proceedings of the 2-nd International Conference "Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application" (ACSN-2005), September 21-23, 2005, Lviv, Ukraine. – pp.106-108

53. Melnyk A., Golembo V., Botchkaryov A., Multiagent approach to the distributed autonomous explorations // Proceedings of NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS-2007), Edinburgh, UK, 2007. - pp.606-610
54. Golembo V., Botchkaryov A. Applying the concepts of multi-agent approach to the distributed autonomous explorations // International Book Series "Information Science and computing", No:13 – "Intelligent Information and Engineering Systems", supplement to International Journal "Information Technologies and Knowledge", Volume 3, 2009. – pp.136-142
55. Колмогоров А.Н. Три подхода к определению понятия "количество информации". – Проблемы передачи информации, 1965, т.1, № 1.
56. Харкевич А.А. О ценности информации. – Проблемы кибернетики / Под ред. А.А. Ляпунова. – М.: Физматгиз, 1960, № 4.
57. Коган И.М. Прикладная теория информации. – М.: Радио и связь, 1981. – 216с.
58. Jörn Behrens, Adaptive atmospheric modeling: key techniques in grid generation, data structures, and numerical operations with applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
59. Бочкаръов О.Ю., Голембо В.А. Інтерполяційна модель колективної поведінки мобільних агентів вимірювально-обчислювальної мережі // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі", 2003, № 492. – С.21-27
60. E. Klavins, R. Ghrist and D. Lipsky, A Grammatical Approach to Self-Organizing Robotic Systems, IEEE Transactions on Automatic Control. Jun. 2006, Vol. 51, No. 5, pp. 949-962
61. Botchkaryov A., Kovala S. CyberCromlech: A new framework for collective behaviour game experiments, in Proceedings of 20th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS-2006), Bonn, Sankt Augustin, Germany, 28-31 May, 2006. - pp.540-545
62. Botchkaryov A., Kovala S. Modeling the Emergent Behaviour using the Multi-agent Conditional Interplay, In Proceedings of 19th European Modeling & Simulation Symposium (EMSS 2007), Bergeggi, Italy, 4-6 October, 2007. - pp.95-100

63. Botchkaryov A., Golembo V. Concept of Multi-agent Conditional Interplay // Proceeding of the 3-rd International Conference ACSN-2007, Lviv Polytechnic National University, September 20-22, 2007. - pp.94-96
64. 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. - pp.100-105
65. Бочкарьов О.Ю. Проблема структурної адаптації автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем // Збірник праць 4-ї Міжнародної конференції "Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання" (ACSN'2009), Львів, 9-11 листопада, 2009. – С.221-224
66. Botchkaryov A., Kovala S. A new approach to coordinate multi-agent interaction and decision making // Матеріали 4-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси» (ІРТК-2011), Київ, 23-25 травня, 2011. – С.272-275
67. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А. Метод координації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів на основі відкладеної у часі інформаційної взаємодії // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі», № 806, 2014. - С.22-26
68. Бочкарьов О.Ю. Вирішення задачі механічного врівноваження колективом мобільних агентів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі", 2002, № 463. – С.14-18
69. Стахов А.П. Введение в алгоритмическую теорию измерения. – М.: "Сов. радио", 1977.
70. Стахов А.П. Алгоритмическая теория измерения. – М.: Знание, 1979. – 64с.
71. Демьянов В.Ф., Малоземов В.Н. Введение в минимакс. – М.: Наука, 1972. – 368с.
72. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А., Попадюк Х.Р. Самоорганізація колективу мобільних агентів у просторі: формування многокутника // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп'ютерні системи та мережі”, 2004, № 523. – С.15-23

73. Бочкар'юв О.Ю., Голембо В.А., Попад'юк Х.Р. Розробка та вирішення тестових задач просторової самоорганізації багатоагентної системи // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі", № 546, 2005. – С.17-23
74. Голембо В.А., Бочкар'юв О.Ю., Попад'юк Х.Р. Проблема алгоритмічного забезпечення колективної поведінки автономних мобільних агентів в задачах просторової самоорганізації // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі" № 603, 2007. - С.26-30
75. Botchkaryov A., Golembo V., Popaduk H. Methods of spatial self-organization of mobile agents' collective: ways of application // Proceeding of the 3-rd International Conference ACSN-2007, Lviv Polytechnic National University, September 20-22, 2007. - pp.107-108
76. Golembo V.A., Botchkaryov A.U. Approaches to design the multifunctional sensor system for determination of water environment parameters // Sensors and Actuators (A-Physical), N 76, 1999. - pp.305-309
77. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена - М.: Атомиздат, 1979.-416с.
78. Цой П.В. Методы расчета задач тепломассопереноса - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 414с.
79. Никитенко Н.И. Теория тепломассопереноса - К.: Наукова думка, 1983.- 352с.
80. Андерсон Д. и др. Вычислительная гидромеханика и теплообмен : В 2-х томах, т.2 - М.: Мир, 1990. - 384с.
81. Бабенко Ю.И. Терломассообмен: Метод расчета тепловых и диффузионных потоков - Л.: Химия, 1986. - 144с.
82. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи - М.: Мир, 1983. - 512с.
83. Бочкар'юв О.Ю., Голембо В.А., Грицуляк Т.О., Параметрична самоорганізація колективу автономних вимірювальних агентів: задача оточення зони збурень // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі", 2004, № 523. – С.6-15
84. Голембо В.А., Бочкар'юв О.Ю., Січ Т.М. Шляхи покращення медіанного алгоритму рівномірного оточення зони збурень колективом автономних

мобільних агентів // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі», № 717, 2011. - С.17-23

85. Голембо В.А., Бочкар'юв О.Ю., Січ Т.М. Медіанний алгоритм рівномірного оточення зони збурень колективом автономних мобільних агентів // 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

86. Голембо В.А., Бочкар'юв О.Ю., Ціж А.М. Задача формування індивідуальних зон відповідальності колективом мобільних агентів // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп'ютерні системи та мережі”, 2006, № 573. – С. 62-67

87. Бочкар'юв О.Ю., Голембо В.А., Ціж А.М. Колективна поведінка мобільних агентів у задачах рівномірного розподілу обмеженої території // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп'ютерні системи та мережі” № 630, 2008. - С.31-35

88. Richard M. Murray, Recent Research in Cooperative Control of Multi-Vehicle Systems, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Aug 2006.

89. Andrews, G. Foundations of Multithreaded, Parallel, and Distributed Programming. Reading, MA: Addison-Wesley, 2000.

90. 4. Jorge Cortes, Sonia Martinez, Timur Karatas, and Francesco Bullo, Coverage control for mobile sensing networks // IEEE Conference on Robotics and Automation, May 2002, Arlington, VA, pp. 1327-1332.

91. Paley D., Zhang F., Leonard N., Cooperative Control for Ocean Sampling: The Glider Coordinated Control System, IEEE Transactions On Control Systems Technology, April 30, 2006.

92. Craig W. Reynolds, Steering Behaviors For Autonomous Characters, Sony Computer Entertainment America, presented on Game Developers Conference, February 10, 1999.

93. Fudenberg, D., Levine, D.K.: The Theory of Learning in Games. MIT Press, 1998.

94. Jose M. Vidal, Learning in Multiagent Systems: An Introduction from a Game-Theoretic Perspective, In Eduardo Alonso, editor, Adaptive Agents: LNAI 2636. Springer Verlag, 2003.
95. Michael Bowling, Manuela Veloso, An Analysis of Stochastic Game Theory for Multiagent Reinforcement Learning, Tech.Report CMU-CS-00-165, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2000.
96. Michael Bowling, Manuela Veloso, Existence of Multiagent Equilibria with Limited Agents, Tech.Report CMU-CS-02-104, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2002.
97. Льюс Р.Д., Райфа Х. Игры и решения. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. – 642с.
98. Голембо В.А., Бочкаръов О.Ю., Підходи до побудови концептуальних моделей кіберфізичних систем, Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні науки та інформаційні технології», №864, 2017. - С.-168-178
99. Бочкаръов О.Ю., Голембо В.А. Використання інтелектуальних технологій збору даних у автономних кібер-фізичних системах // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі», №830, 2015. - С.-7-11.
100. Бочкаръов О.Ю., Голембо В.А. Використання технологій інтелектуального збору даних у кіберфізичних системах // Матеріали Першого наукового семінару «Кіберфізичні системи: досягнення та виклики», НУЛП, Львів, 25-26 червня, 2015. - С.24-27
101. Глушков В.М. Самоорганизующиеся системы и абстрактная теория автоматов // Журн. вычисл. матем. и матем. физики, т. 2, № 3, 1962.
102. Саридис Дж. Самоорганизующиеся стохастические системы управления. М.: Наука, 1981. 469 с.
103. Самоорганизующиеся системы. – М.: Мир, 1964. – 435с.
104. Принципы самоорганизации. – М.: Мир, 1966. – 621с.

105. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: Наука, 1968. – 400с.
106. Цыпкин Я.З. Основы теории обучающихся систем. – М.: Наука, 1970. – 253с.
107. Срагович В.Г. Теория адаптивных систем. – М.: Наука, 1976. – 319с.
108. Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Гребеняк А.В. Проблема організації узгоджених колективних дій автономних мобільних підводних апаратів // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні науки та інформаційні технології», № 650, 2009. – С.167-173
109. Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Підходи до вирішення проблеми самоорганізації колективу автономних мобільних підводних апаратів // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Підводна техніка і технологія» (ПТТ-2012), Миколаїв, 30 – 31 жовтня, 2012. – С.121-127
110. Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Кусьпісь О.П. Проблема організації переміщення мобільного вимірювального агента у складі розподіленої системи автономних досліджень // Вимірювальна техніка та метрологія, 2007, № 67. - С.78-82
111. Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Кусьпісь О.П. Аналіз способів організації переміщення мобільних вимірювальних агентів // Вимірювальна техніка та метрологія, 2008, № 69. - С.39-42
112. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А. Способи організації переміщення мобільних вимірювальних агентів: підходи до побудови концептуальних моделей // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі», № 658, 2009. - С.15-20
113. Мельник А.О., Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Кусьпісь О.П. Проблема самоорганізації багатоагентної системи виявлення та відстеження порушників // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» "Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика", № 548, 2005. – С.11-15
114. Мельник А.О., Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Кусьпісь О.П. Автономна адаптивна система виявлення та відстеження порушників // Вісник Національного

університету “Львівська політехніка” “Комп’ютерні системи та мережі” № 603, 2007. - С.87-93

115. Melnyk A., Golembo V., Botchkariov A., Kuspis O. Development of multi-agent systems for intruders’ detection and tracking // Proceeding of the 3-rd International Conference ACSN-2007, Lviv Polytechnic National University, September 20-22, 2007. - pp.109-110

116. Бочкаръов О.Ю., Голембо В.А., Крайкін Ю.А., Бездротова мережа сенсорних та виконавчих вузлів у складі кіберфізичної системи // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп’ютерні системи та мережі», № 881, 2017. - С.-15-24.

117. Botchkaryov A., Kraikin Yu. Wireless Sensor-Actuator Network based on the SoC ESP8266 for Mobile Cyber-Physical Systems // Advances in Cyber-Physical Systems, Lviv, Vol. 2, No. 2, 2017 – p.39-46.

118. Brendan Gregg, Systems Performance: Enterprise and the Cloud, Prentice Hall, 2014. - 735 p.

119. Douglas R. Mauro, Kevin J. Schmidt, Essential SNMP: Help for System and Network Administrators, O'Reilly Media; 2 edition, 2005. - 462 p.

120. Larry Walsh, SNMP MIB Handbook, Wyndham Press, 2008. - 408 p.

121. Mike Julian, Practical Monitoring: Effective Strategies for the Real World, O'Reilly Media, 2017. - 170 p.

ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав, що входять до міжнародних наукометричних баз, та статті у фахових наукових виданнях, затверджених Міністерством освіти і науки України:

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

9. Бочкар'юв О. Ю. Колективна поведінка мобільних інтелектуальних агентів в задачах автономних розподілених досліджень / О. Ю. Бочкар'юв // 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. Бочкар'юв, 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. Бочкар'юв, 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. Бочкар'юв, 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. Бочкар'юв, О. П. Кусьпісь // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2007. – № 603: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 87–93.

14. Бочкар'юв О. Ю. Колективна поведінка мобільних агентів у задачах рівномірного розподілу обмеженої території / О. Ю. Бочкар'юв, 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'єв, А. Гребеняк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – № 650: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 168–173.

16. Бочкар'єв О. Ю. Структурна адаптація автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем / О. Ю. Бочкар'єв // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2010. – № 688: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 16–22.

17. Бочкар'єв О. Ю. Самоорганізація автономних розподілених систем у задачах прийняття рішень в умовах невизначеності / О. Ю. Бочкар'єв, 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'єв, Т. М. Січ // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 717: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 17–23.

19. Бочкар'єв О. Ю. Проблема організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів у автономних розподілених системах / О. Ю. Бочкар'єв // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2012. – № 745: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 20–26.

20. Бочкар'єв О. Ю. Автономні розподілені системи з елементами самоорганізації: проблеми та напрямки розвитку / О. Ю. Бочкар'єв, В. А. Голембо // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2012. – № 745: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 26–32.

21. Бочкар'єв О. Ю. Метод координації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів на основі відкладеної у часі інформаційної взаємодії / О. Ю. Бочкар'єв, В. А. Голембо // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2014. – № 806: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 22–26.

22. Бочкар'єв О. Ю. Використання інтелектуальних технологій збору даних у автономних кіберфізичних системах / О. Ю. Бочкар'єв, 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.

Апробація результатів дисертації

Основні положення роботи викладено і обговорено на міжнародних наукових конференціях та наукових семінарах та опубліковано у відповідних матеріалах:

24. Botchkariov A., Collective behavior of mobile agents solving distributed sensing task / A. Botchkariov, V. Golembo // 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. Kovela // 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. Botchkaryov // 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 вимірювальних-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. Бочкарьов // 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.

ДОДАТОК Б. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

зокрема інтерполяційну та ентропійну моделі колективної поведінки вимірювальних агентів,

- розроблено метод децентралізованого управління колективною поведінкою мобільних вимірювальних агентів на основі принципів самоорганізації, який на відміну від відомих забезпечує можливість розв'язання задач автономних розподілених досліджень за умов нестачі інформації про динамічні характеристики середовища, що впливають на рух агентів;


«Інтеграція методів і засобів вимірювання, автоматизації, опрацювання та захисту інформації в базисі кібер-фізичних систем» (номер державної реєстрації 0115U000446), при виконанні якої

- розроблено принципи побудови засобів збору та доставки інформації кіберфізичних систем на основі автономних вимірювально-обчислювальних вузлів з використанням багатоагентних технологій, зокрема розроблено метод структурної адаптації вимірювально-обчислювальних процесів в децентралізованих автономних розподілених системах 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, дозволяє вирішувати задачі оптимального розподілу вимірювальних та обчислювальних ресурсів в автономному режимі за умов невизначеності

- розроблено метод координації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів на основі відкладеної у часі інформаційної взаємодії, який на відміну від існуючих реалізує принцип функціональної декомпозиції, що забезпечує одночасний розв'язок підзадачі оптимізації та координації спільних дій вимірювально-обчислювальних процесів по збору інформації і підзадачі оптимізації внутрішньої між-процесної взаємодії за умов децентралізованого управління.

Голова комісії

Начальник НДЧ,
к.т.н., доцент


Жук Л. В.

Члени комісії

Зав. каф. ЕОМ, д.т.н., професор


Мельник А. О.

Завідувач відділу науково-організаційного
супроводу наукових досліджень, к.т.н.


Лазько Г. В.

Заступник начальника
планово-фінансового відділу


Чулой Т. М.

«03» _ 09 2018 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор з науково-педагогічної роботи
 Національного університету

"Львівська політехніка"

к.т.н., доц.

О.Р. Давидчак

" 12 " 06 2018 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційного дослідження старшого викладача кафедри електронних обчислювальних машин Бочкарьова Олексія Юрійовича на тему: «Організація адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах» ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти»

Комісія у складі: голови – завідувача кафедри електронних обчислювальних машин (ЕОМ), д.т.н, професора Мельника А.О., членів комісії: к.т.н., доц. Березко Л.О., к.т.н., доц. Ваврука Є.Я. цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження Бочкарьова О. Ю. на тему: «Організація адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах» використані співробітниками кафедри ЕОМ Інституту комп'ютерних технологій автоматики та метрології (ІКТА) Національного університету «Львівська політехніка» при підготовці і викладанні курсу лекцій навчальних дисциплін: «Комп'ютерні системи» (для освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр», спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»), «Теорія інтелектуальних систем» (для освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр», спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія», спеціалізація «Комп'ютерні системи та мережі»), «Організація обчислювальних процесів в паралельних системах» (для освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр»,

спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія», спеціалізація «Комп'ютерні системи та мережі») та при підготовці бакалаврських та магістерських кваліфікаційних робіт (спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»).

Голова комісії

Зав. каф. ЕОМ, д.т.н., професор



Мельник А. О.

Члени комісії

Доц. каф. ЕОМ, к.т.н., доцент



Беренко Л. О.

Доц. каф. ЕОМ, к.т.н., доцент



Ваврук Є. Я.

«12» _ 06 2018 р.

Вих. № 1438
«17» грудня 2018 р.

Довідка

про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
Бочкарьова Олексія Юрійовича
«Організація адаптивних вимірювально-обчислювальних
процесів в автономних розподілених системах»,
спеціальність 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти»

Результати дисертаційної роботи Бочкарьова О.Ю. на тему «Організація адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах» використані при створенні нових методів та засобів телекомунікації та систем збору інформації. В проектно-технічних рішеннях НВПП "СПАРИНГ-ВІСТ ЦЕНТР" знайшли впровадження наступні результати дисертаційної роботи Бочкарьова О.Ю.

- метод структурної адаптації вимірювально-обчислювальних процесів в децентралізованих автономних розподілених системах на основі машинного навчання блоку прийняття рішень щодо вибору дій на структурному та підпорядкованому йому функціональному рівні, який дозволяє вирішувати задачі оптимального розподілу вимірювальних та обчислювальних ресурсів в автономному режимі за умов невизначеності, що забезпечує високу надійність та живучість систем збору інформації;

- структура та прототипи сенсорного та виконавчого вузів автономної розподіленої системи виявлення та відстеження порушників на основні запропонованих методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів.

Впроваджені наукові та прикладні результати дисертаційної роботи Бочкарьова О.Ю. дозволили підвищити ефективність та надійність телекомунікаційних систем та систем збору інформації на основі технологій бездротового зв'язку.

Генеральний директор
науково-виробничого
приватного підприємства
«Спаринг-Віст Центр»

Смук Р. Т.



ПП „НВПП „Спаринг-Віст Центр“
Україна, 79026, м. Львів, вул. Володимира Великого, 33
тел.: (032) 2421515, факс: (032) 2422015
e-mail: market@ecotest.ua, www.ecotest.ua

ТОВ «Інтелектуальні вендінгові системи»
79000, м.Львів, вул. Угорська, 14

«20» зручня 2018 р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи
 на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Бочкарьова Олексія Юрійовича

**«Організація адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів
 в автономних розподілених системах»**

(спеціальність 05.13.05 - Комп'ютерні системи та компоненти)

Цим підтверджується, що результати дисертаційної роботи Бочкарьова Олексія Юрійовича на тему «Організація адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах» використані в проектно-технічних рішеннях ТОВ «Інтелектуальні вендінгові системи» в області розробки та тестування вендінгових технологій. Запропоновані в дисертаційній роботі Бочкарьова О.Ю. моделі та методи децентралізованого управління адаптивними вимірювально-обчислювальними процесами за умов динамічних змін їх кількості та параметрів їх інформаційної взаємодії використано для підвищення надійності роботи та живучості розподіленого процесингового програмно-апаратного комплексу ТОВ «Інтелектуальні вендінгові системи». Використання запропонованого в дисертаційній роботі методу координації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів, який забезпечує одночасний розв'язок підзадачі оптимізації та координації спільних дій вимірювально-обчислювальних процесів по збору інформації і підзадачі оптимізації внутрішньої між-процесної взаємодії за умов децентралізованого управління дозволило підняти ефективність та забезпечити більшу надійність роботи системи моніторингу торгових терміналів.

Впроваджені результати дисертаційної роботи Бочкарьова О.Ю. дозволили підвищити технічну ефективність та надійність роботи процесингового програмно-апаратного комплексу ТОВ «Інтелектуальні вендінгові системи» та системи моніторингу торгових терміналів.

Директор
 ТОВ «Інтелектуальні
 вендінгові системи»



Кемпа С.М.

ТОВ «ДЖЕТСОФТПРО УКРАЇНА»
79034, м.Львів, вул. Угорська, 14

«29» січня 2019 р.

Довідка

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
Бочкарьова Олексія Юрійовича
на тему: «Організація адаптивних вимірювально-обчислювальних
процесів в автономних розподілених системах»
для здобуття ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти»

Наукові положення та результати дисертаційного дослідження Бочкарьова О. Ю. на тему «Організація адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів в автономних розподілених системах» використані в проектно-технічних рішеннях ТОВ «ДЖЕТСОФТПРО УКРАЇНА» в області розподілених програмних систем, інтернет-технологій та технологій мобільних обчислень. Впровадження запропонованих в дисертаційній роботі Бочкарьова О. Ю. моделей та методів організації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів при створенні розподілених програмних комплексів на основі мобільних програмних платформ дозволило підняти ефективність та забезпечити більшу надійність їх роботи. Використання запропонованих в дисертаційній роботі методів децентралізованого управління адаптивними вимірювально-обчислювальними процесами дозволило вирішити проблему масштабування в роботі програмних технологій збору інформації в системах моніторингу мобільних комп'ютерних мереж. Запропонований в дисертаційній роботі метод структурної адаптації вимірювально-обчислювальних процесів на основі методів машинного навчання використано при розробці інтелектуальних технологій моніторингу та виявлення аномалій в роботі програмного забезпечення мобільних обчислювальних пристроїв.

Генеральний директор
ТОВ «ДЖЕТСОФТПРО УКРАЇНА»



Харитонов С. Ю.

ДОДАТОК В. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ СТРУКТУРНОЇ АДАПТАЦІЇ ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

```

void CDInit (void)
{
    float rnum;

    for (int i=0; i < nSr; i++)
        for (int j=0; j < nSr; j++)
            {
                CD[i][j] = 0;

                rnum = (float)rand() / (float)RAND_MAX;
                if (rnum < pc) CD[i][j] = 1;

                if (i==j) CD[i][j] = 0;
            }
}

int dRand (float* _array, int size)
{
    int _rnum = size-1;
    float _left = 0;
    float _right = _array[0];
    float ftmp = (float)rand() / (float)RAND_MAX;

    for (int i=0; i < size-1; i++)
        {
            if ((ftmp >= _left) && (ftmp < _right)) {_rnum = i; break;}
            _left = _right;
            _right += _array[i+1];
        }

    return _rnum;
}

void CDInit2 (void)
{
    float rnum;

    for (int i=0; i < nSr; i++)
        for (int j=0; j < nSr; j++)
            CD[i][j] = 0;

    for (int i=0; i < nSr; i++)
        for (int j=i; j < nSr; j++)
            {
                rnum = (float)rand() / (float)RAND_MAX;
                if (rnum < pc) {CD[i][j] = 1; CD[j][i] = 1;}

                if (i==j) CD[i][j] = 0;
            }
}

void CDInit3 (void)
{
    float rnum;

    for (int i=0; i < nSr; i++)

```



```

void binMABvInit (void)
{
    for (int i=0; i < nSr; i++)
        sePv[i] = (float)rand() / (float)RAND_MAX;
}

int binMABvResponse (int agID)
{
    int _r, _action = action[agID];
    float rnum = (float)rand() / (float)RAND_MAX;

    if (rnum < sePv[_action])    _r = REWARD;
    else                        _r = PENALTY;

    return _r;
}

void adjustMC (int agID)
{
    if (rv[agID] > 0) {

        if (em0 > 0)
            em0 = em0 - delta;
            //em0 = em0 - ((float)rv[agID]/100) * delta;
        if (em0 < 0) {
            em0 = 0;
            MABvStopped = 1;
        }
        if (em1 < 1)
            em1 = em1 + delta;
            //em1 = em1 + ((float)rv[agID]/100) * delta;
        if (em1 > 1) {
            em1 = 1;
            MABvStopped = 1;
        }
    }
}

void countActivatedConnections (void)
{
    int tmpi, tmpj;

    for (int i=0; i < nSr; i++)
        for (int j=i; j < nSr; j++)
            {
                tmpi = chosenByAgent(i);
                tmpj = chosenByAgent(j);
                if (CD[i][j]==1 && tmpi==1 && tmpj==1)
                    {
                        MCF[i][j]++;
                        MCF[j][i]++;
                    }
                if (i==j) MCF[i][j] = 0;
            }
}

void calculateTrueValuesOfZs (void)
{
    float Zcount;

    for (int i = 0; i < nSr; i++) {

```

```

        Zcount = (float) nSr - 1;

        for (int j = 0; j < nSr; j++) {
            if (i != j) {
                if (CD[i][j] == 1)
                    Zcount--;
            }
        }

        Zs[i] = Zcount / (nSr - 1);
    }
}

void adjustZ (int sourceID)
{
    int i;
    float Zcount = (float)nSr - 1;
    float tmp = 0.0f, rnum, _Zs, _Za, sum = 0.0f;

    for (i=0; i < nSr; i++)
    {
        if (i != sourceID)
        {
            if (CD[sourceID][i] == 0) tmp = em0; else tmp = em1;
            rnum = (float)rand() / (float)RAND_MAX;
            if (rnum < tmp) Zcount--;
        }
    }

    _Zs = Zcount / (nSr - 1);
    for (i=0; i < nSr; i++)
    {
        if (i != sourceID)
        {
            sum = sum + (float)Mcf[sourceID][i];
        }
    }

    _Za = ((nSr - 1) - sum/t) / (nSr - 1);
    Za[sourceID] = _Za;

    Z[sourceID] = _Zs + _Za;
}

void correctMABvResponse (int agID)
{
    if (rv[agID] == 1 && MABvStopped == 1) rv[agID] = 0;
}

void ceInit (void)
{
    int i,j;
    float _sum1, _sum2;

    for (i=0; i < nS; i++)
        for (j=0; j < nA; j++)
            cePa[i][j] = (float)rand() / (float)RAND_MAX;

    for (i=0; i < nS; i++)

```

```

{
    _sum1 = 0;
    _sum2 = 0;

    for (j=0; j < nS; j++)
    {
        cePs[i][j] = (float)rand() / (float)RAND_MAX;
        _sum1 += cePs[i][j];
    }

    for (j=0; j < nS-1; j++)
    {
        cePs[i][j] = cePs[i][j] / _sum1;
        _sum2 += cePs[i][j];
    }

    cePs[i][nS-1] = 1.0f - _sum2;
}

ceState = uRand(nS);
}

int ceResponse (int agID)
{
    int _r, _action = action[agID];

    float rnum = (float)rand() / (float)RAND_MAX;

    if (rnum < cePa[ceState][_action]) _r = REWARD;
    else _r = PENALTY;

    ceState = dRand(cePs[ceState],nS);

    return _r;
}

int environment (int _env, int agID)
{
    int _r = 0;

    switch (_env)
    {
        case 0: _r = seResponse(agID); break;
        case 1: _r = ceResponse(agID); break;
        default: printf("msa error: wrong env code specified\n");
    }

    return _r;
}

int argmax(float* _array, int size)
{
    int _arg = uRand(size);
    float _max = _array[_arg];

    for (int i=0; i < size; i++)
        if (_array[i] > _max) {_max = _array[i]; _arg = i;}

    return _arg;
}

```

```

void initAgent (int _ag, int id)
{
    int i;

    // initialize Aw
    for(i=0;i<nA;i++) {ru[i]=0; rv[i]=0; kau[id][i]=0; rau[id][i]=0;
Qu[id][i]=1.0f;};

    // initialize Ar
    for(i=0;i<nA;i++) {ru[i]=0; rv[i]=0; kav[id][i]=0; rav[id][i]=0;
Qv[id][i]=1.0f;};

    // initialize As
    for(i=0;i<nA;i++) {rs[i]=0; kas[id][i]=0; ras[id][i]=0; Qs[id][i]=1.0f;};

    action[id] = uRand(nA) + (id * nA);
}

int greedy (int id)
{
    int _action = action[id];

    ra[id][action[id]] += response[id];
    ka[id][action[id]]++;
    Q[id][action[id]] = (float)ra[id][action[id]] / (float)ka[id][action[id]];

    _action = argmax(Q[id],nA);

    return _action;
}

int epsilonGreedy (int id)
{
    int _action = action[id];

    ra[id][action[id]] += response[id];
    ka[id][action[id]]++;
    Q[id][action[id]] = (float)ra[id][action[id]] / (float)ka[id][action[id]];

    float rnum = (float)rand() / (float)RAND_MAX;
    if (rnum < e) _action = uRand(nA);
    else _action = argmax(Q[id],nA);

    return _action;
}

int softmax (int id)
{
    int i;
    int _action = action[id];
    float tmp[N_ACTIONS], pSum = 0.0f;

    ra[id][action[id]] += response[id];
    ka[id][action[id]]++;
    Q[id][action[id]] = (float)ra[id][action[id]] / (float)ka[id][action[id]];

    for (i=0; i < nA; i++) {tmp[i] = expf(Q[id][i]/tau); pSum += tmp[i];}
    for (i=0; i < nA; i++) {p[id][i] = tmp[i]/pSum;}

    _action = dRand(p[id],nA);

    return _action;
}

```

```

int greedyINT (int id)
{
    int _action = action[id];

    ra[id][action[id]] += response[id];
    ka[id][action[id]]++;
    Q[id][action[id]] = (float)ra[id][action[id]] / (float)ka[id][action[id]];

    int left = (id==0)?(nK-1):(id-1);
    int right = (id==(nK-1))?0:(id+1);
    for (int i=0; i<nA; i++) Q[id][i] = (Q[left][i] + Q[id][i] + Q[right][i]) /
3.0f;

    _action = argmax(Q[id],nA);

    return _action;
}

int epsilonGreedyINT (int id)
{
    int _action = action[id];

    ra[id][action[id]] += response[id];
    ka[id][action[id]]++;
    Q[id][action[id]] = (float)ra[id][action[id]] / (float)ka[id][action[id]];

    int left = (id==0)?(nK-1):(id-1);
    int right = (id==(nK-1))?0:(id+1);
    for (int i=0; i<nA; i++) Q[id][i] = (Q[left][i] + Q[id][i] + Q[right][i]) /
3.0f;

    float rnum = (float)rand() / (float)RAND_MAX;
    if (rnum < e) _action = uRand(nA);
    else _action = argmax(Q[id],nA);

    return _action;
}

int softmaxINT (int id)
{
    int i;
    int _action = action[id];
    float tmp[NACTIONS], pSum = 0.0f;

    ra[id][action[id]] += response[id];
    ka[id][action[id]]++;
    Q[id][action[id]] = (float)ra[id][action[id]] / (float)ka[id][action[id]];

    int left = (id==0)?(nK-1):(id-1);
    int right = (id==(nK-1))?0:(id+1);
    for (int i=0; i<nA; i++) Q[id][i] = (Q[left][i] + Q[id][i] + Q[right][i]) /
3.0f;

    for (i=0; i < nA; i++) {tmp[i] = expf(Q[id][i]/tau); pSum += tmp[i];}
    for (i=0; i < nA; i++) {p[id][i] = tmp[i]/pSum;}

    _action = dRand(p[id],nA);

    return _action;
}

int Aw (int id)

```

```

{
    int i;
    int _action;
    float tmp[N_ACTIONS], pSum = 0.0f, Q[N_ACTIONS], _r, _e;

    d[id][0] = action[id];
    d[id][1] = action[id] - (nA * id);

    _e = 2 * em1 - 1; // _e = avrRmasv;
    _r = _e * ru[id] + (1 - _e) * lru[id];

    rau[id][d[id][1]] += _r;
    kau[id][d[id][1]]++;
    Qu[id][d[id][1]] = (float)rau[id][d[id][1]] / (float)kau[id][d[id][1]];

    for (i=0; i < nA; i++) {Q[i] = Qu[id][i] + (alfa * Z[d[id][0])};

    for (i=0; i < nA; i++) {tmp[i] = expf(Q[i]/tau); pSum += tmp[i];}
    for (i=0; i < nA; i++) {p[id][i] = tmp[i]/pSum;}

    float rnum = (float)rand() / (float)RAND_MAX;
    if (rnum < e)      _action = uRand(nA);
    else              _action = argmax(Q, nA); //argmax(Qu[id], nA);
    return _action + (nA * id);
}

int Ar (int id)
{
    int i;
    int _action;
    float tmp[N_ACTIONS], pSum = 0.0f;

    d[id][0] = action[id];
    d[id][1] = action[id] - (nA * id);

    rav[id][d[id][1]] += rv[id];
    kav[id][d[id][1]]++;
    Qv[id][d[id][1]] = (float)rav[id][d[id][1]] / (float)kav[id][d[id][1]];

    Qv[id][d[id][1]] = Qv[id][d[id][1]] + confidence *
sqrt(log(t)/kav[id][d[id][1]]);

    _action = argmax(Qv[id], nA);

    return _action + (nA * id);
}

int As_uRand (int id)
{
    int _action, _actionAw, _actionAr;
    int _mode = uRand(2);
    if (_mode == 0)  _action = Aw(id);
    else            _action = Ar(id);

    return _action;
}

int As_MSA1 (int id)
{
    int i, _mode = 0;
    int _action = action[id], _actionAw=0, _actionAr=0;
    float tmp[2], pSum = 0.0f;

```

```

if (t==0) {aMode[id] = uRand(2); return _action;}
_actionAw = Aw(id);
_actionAr = Ar(id);
if (aMode[id] == 0) _action = _actionAw; //Aw(id);//
else _action = _actionAr; //Ar(id);//

if (t % Astau == 0) {
    if (id==0) As_counter2++;
    rs[id] = Ku * (old_As_sumRmasuS - As_sumRmasuS) + Kv *
(old_As_sumRmasvS - As_sumRmasvS);

    ras[id][aMode[id]] += rs[id];
    kas[id][aMode[id]]++;
    Qs[id][aMode[id]] = (float) ras[id][aMode[id]] / (float)
kas[id][aMode[id]];

    Qs[id][aMode[id]] = Qs[id][aMode[id]] + confidence * sqrt(log(t) /
kas[id][aMode[id]]);
    for (i = 0; i < 2; i++) {
        tmp[i] = expf(Qs[id][i] / tau);
        pSum += tmp[i];
    }
    for (i = 0; i < 2; i++) {
        p[id][i] = tmp[i] / pSum;
    }

    _mode = argmax(Qs[id], 2);
    aMode[id] = _mode;
}

return _action;
}

int MPAuL (int id)
{
    int i;
    int _action;
    float Q[NACTIONS], _r, _e;

    d[id][0] = action[id];
    d[id][1] = action[id] - (nA * id);

    // reward is the reward in MABu
    // _r = lru[id];
    _e = 2 * em1 - 1;
    _r = _e * ru[id] + (1 - _e) * lru[id];

    // modify estimated action value
    rau[id][d[id][1]] += _r;
    kau[id][d[id][1]]++;
    Qu[id][d[id][1]] = (float)rau[id][d[id][1]] / (float)kau[id][d[id][1]];

    // modify action values according to M(C) (model of mutual information in
sources)
    for (i=0; i < nA; i++) {Q[i] = Qu[id][i] + (alfa * Z[d[id][0]])};

    // select next action: greedy RL = Local optimization
    _action = argmax(Q, nA);
    //_action = argmax(Qu[id], nA);

    return _action + (nA * id);
}

```

```

int MPAuvL (int id)
{
    int i;
    int _action;
    float Q[NACTIONS], _r, _e;

    d[id][0] = action[id];
    d[id][1] = action[id] - (nA * id);

    // reward is a combination of the reward in MABu and the reward in MABv
    // _r = lru[id] + beta1 * rv[id];
    _e = 2 * em1 - 1;
    _r = _e * ru[id] + (1 - _e) * lru[id];
    _r = _r + beta1 * rv[id];

    // modify estimated action value
    rau[id][d[id][1]] += _r;
    kau[id][d[id][1]]++;
    Qu[id][d[id][1]] = (float)rau[id][d[id][1]] / (float)kau[id][d[id][1]];

    // modify action values according to M(C) (model of mutual information in
sources)
    for (i=0; i < nA; i++) {Q[i] = Qu[id][i] + (alfa * Z[d[id][0]])};

    // select next action: greedy RL = Local optimization
    _action = argmax(Q,nA);
    //_action = argmax(Qu[id],nA);

    return _action + (nA * id);
}

int MPAuG (int id)
{
    int i;
    int _action;
    float Q[NACTIONS], _r, _e;

    d[id][0] = action[id];
    d[id][1] = action[id] - (nA * id);

    _e = 2 * em1 - 1;
    _r = _e * ru[id] + (1 - _e) * lru[id]; // = lru[id]; //avrRmasv

    rau[id][d[id][1]] += _r;
    kau[id][d[id][1]]++;
    Qu[id][d[id][1]] = (float)rau[id][d[id][1]] / (float)kau[id][d[id][1]];

    for (i=0; i < nA; i++) {Q[i] = Qu[id][i] + (alfa * Z[d[id][0]])};

    float rnum = (float)rand() / (float)RAND_MAX;
    if (rnum < e) _action = uRand(nA);
    else _action = argmax(Q,nA); //argmax(Qu[id],nA);

    return _action + (nA * id);
}

int MPAuvG (int id)
{
    int i;
    int _action;
    float Q[NACTIONS], _r, _e;

```



```

d[id][0] = action[id];
d[id][1] = action[id] - (nA * id);

_e = 2 * em1 - 1;
_r = _e * ru[id] + (1 - _e) * lru[id];
_r = _r + beta1 * rv[id];

rau[id][d[id][1]] += _r;
kau[id][d[id][1]]++;
Qu[id][d[id][1]] = (float)rau[id][d[id][1]] / (float)kau[id][d[id][1]];

for (i=0; i < nA; i++) {Q[i] = Qu[id][i] + (alfa * Z[d[id][0])};

float rnum = (float)rand() / (float)RAND_MAX;
if (rnum < e)      _action = uRand(nA);
else              _action = argmax(Q, nA);

return _action + (nA * id);
}

```

```

int agent (int _ag, int id)
{
    int _a = 0;

    switch (_ag)
    {
        case 0: _a = randomAgent2(id); break;
        //case 1: _a = perfectAgent(); break;
        case 2: _a = Aw(id); break;
        case 3: _a = Ar(id); break;
        case 4: _a = As_uRand(id); break;
        case 5: _a = As_MSA1(id); break;
        case 6: _a = MPAuL(id); break;
        case 7: _a = MPAuvL(id); break;
        case 8: _a = MPAuG(id); break;
        case 9: _a = MPAuvG(id); break;
        //case 3: _a = epsilonGreedy(id); break;
        //case 4: _a = softmax(id); break;

        default: printf("msa error: wrong agent code specified\n");
    }

    return _a;
}

```

```

void initMAS (int _mas)
{
    int i;

    switch (_mas)
    {
        case 0: for(i=0;i<nK;i++){initAgent(agt,i); sumRu[i]=0.0f;
avrRu[i]=0.0f; sumRv[i]=0.0f; avrRv[i]=0.0f;} break;
        case 1: for(i=0;i<nK;i++){initAgent(agt,i); sumR[i]=0.0f;
avrR[i]=0.0f;} break;
        case 2: for(i=0;i<nK;i++){initAgent(agt,i); sumRu[i]=0.0f;
avrRu[i]=0.0f; sumRv[i]=0.0f; avrRv[i]=0.0f;} break;
        //case 2: for(i=0;i<nK;i++){initAgent(agt,i); sumR[i]=0.0f;
avrR[i]=0.0f;} break;
        //case 3: for(i=0;i<nK;i++){initAgent(agt-10,i); sumR[i]=0.0f;
avrR[i]=0.0f;} break;
    }
}

```

```

        //case 4: for(i=0;i<nK;i++){initAgent(agt-20,i); sumR[i]=0.0f;
avrR[i]=0.0f;} break;
        default: printf("msa error: wrong mas code specified\n");
    }
}

void calculateResults (int _ii)
{
    float tmpS = 0.0f;
    float tmpA = 0.0f;

    // calculate cumulative results for each agent
    tmpS = 0.0f;
    tmpA = 0.0f;
    for (k=0; k < nK; k++)
    {
        //response[k] = ruCD[k];
        sumR[k] = sumR[k] + (float)response[k];           tmpS = tmpS + sumR[k];
        avrR[k] = sumR[k] / ((float)t + 1);             tmpA = tmpA + avrR[k];
    }

    // calculate cumulative results for multi-agent system
    sumRmas = tmpS / (float)nK;
    avrRmas = tmpA / (float)nK;

    // save results
    _sumR[t][_ii] = sumRmas;
    _avrR[t][_ii] = avrRmas;
}

void calculateMABuResults (int _ii)
{
    float tmpS = 0.0f;
    float tmpA = 0.0f;

    // calculate cumulative results for each agent
    tmpS = 0.0f;
    tmpA = 0.0f;
    for (k=0; k < nK; k++)
    {
        sumRu[k] = sumRu[k] + (float)ru[k];           tmpS = tmpS + sumRu[k];
        avrRu[k] = sumRu[k] / ((float)t + 1);       tmpA = tmpA + avrRu[k];
    }

    if (t % Astau == 0) {
        old_As_sumRmasuS = As_sumRmasuS;
        As_sumRmasuS = 0.0f;
        As_counter1++;
    }
    //old_sumRmasu = sumRmasu;

    // calculate cumulative results for multi-agent system
    sumRmasu = tmpS / (float)nK;
    avrRmasu = tmpA / (float)nK;

    As_sumRmasuS = As_sumRmasuS + sumRmasu;

    // save results
    _sumRu[t][_ii] = sumRmasu;
    _avrRu[t][_ii] = avrRmasu;
}

void calculateMABvResults (int _ii)
{

```

```

float tmpS = 0.0f;
float tmpA = 0.0f;

tmpS = 0.0f;
tmpA = 0.0f;
for (k=0; k < nK; k++)
{
    sumRv[k] = sumRv[k] + (float)rv[k];      tmpS = tmpS + sumRv[k];
    avrRv[k] = sumRv[k] / ((float)t + 1);    tmpA = tmpA + avrRv[k];
}

if (t % Astau == 0) {
    old_As_sumRmasvS = As_sumRmasvS;
    As_sumRmasvS = 0.0f;
}

sumRmasv = tmpS / (float)nK; // sum R per agent
avrRmasv = tmpA / (float)nK; // average R per agent

As_sumRmasvS = As_sumRmasvS + sumRmasv;

_sumRv[t][_ii] = sumRmasv;
_avrRv[t][_ii] = avrRmasv;
}

void getMeanValues (void)
{
    for (t=0; t < T; t++)
    {
        float tmps1 = 0.0f;
        float tmps2 = 0.0f;

        for (int i=0; i < n; i++)
        {
            tmps1 += _sumR[t][i];
            tmps2 += _avrR[t][i];
        }

        sumRm[t] = (float)tmps1 / (float)n;
        avrRm[t] = (float)tmps2 / (float)n;
    }
}

void getMABuMeanValues (void)
{
    for (t=0; t < T; t++)
    {
        float tmps1 = 0.0f;
        float tmps2 = 0.0f;

        for (int i=0; i < n; i++)
        {
            tmps1 += _sumRu[t][i];
            tmps2 += _avrRu[t][i];
        }

        sumRmu[t] = (float)tmps1 / (float)n;
        avrRmu[t] = (float)tmps2 / (float)n;
    }
}

```