

Б. Ю. СКРИПКА, Д. Б. ЄЛЬЧАНІНОВ**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ПОЛІГРУПОВИХ КОНФЛІКТІВ ІНТЕРЕСІВ В СЕРЕДОВИЩІ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ МЕРЕЖІ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АГЕНТІВ**

Якщо енергетичні ресурси представляють собою надмірну цінність для групи агентів розподіленої системи, то виникає логічне питання, яким чином провести ефективний розподіл ресурсів з метою задовольнити потреби кожного агента та виконати розподіл ощадливо, щоб не перевиснажити запаси? Подібна задача має не тривіальне рішення. Наша робота базується на таких моделях, що були досліджені будучи натхненними природними формами існування групових біологічних істот. Об'єктом дослідження є інтелектуальні розподілені системи. Предметом дослідження є процес самоорганізації інтелектуальних агентів у цілісну розподілену систему, що мають спільні інтереси та дослідження ефективних стратегій вирішення виникаючих конфліктних ситуацій між агентами. Актуальність даної роботи. Без енергетичних ресурсів неможливе існування того чи іншого біологічного виду на планеті, а одже баланс і розподіл енергії має ключове значення. Електроенергія зараз є дефіцитним ресурсом – питання про пріоритетність розподілу між різними групами агентів розподіленої мережі є задачею не тільки енергетиків, а і математиків та економістів. Вода, людські ресурси, механічні засоби спільного користування та інше – можуть виступати спірним або конфліктним ресурсом для декількох агентів, котрі потрібно вирішувати. Мета даної роботи проаналізувати та синтезувати актуальні знання за тематикою дослідження в нові підходи-стратегії організації інтелектуальних агентів розподілених систем та сформувати ідеї, гіпотези, спостереження та експериментально-отримані дані, методи та підходи вирішення конфліктних ситуацій між агентами у текстово-графічну технологію для подальшого формування математичної моделі. Основна ідея роботи. Полягає у формуванні нової методики-стратегії урегулювання полігрупових конфліктних ситуацій у розподілених системах, що потенційно дасть можливість до вивільнення і перенаправлення додаткових ресурсів на досягнення кінцевої мети. Використані методи. Науковий експеримент, аналіз та синтез, методи порівняння та аналогій, метод моделювання та прототипування, абстракція та конкретизація, спостереження. Отримані результати: проаналізовано та синтезовано наукові матеріали області даного дослідження в локанічні знання; проведено аналіз тактико-стратегічних прийомів вирішення конфліктних ситуацій в контексті мультиагентних систем; сформовано нові знання у вигляді текстово-графічної технології; розглянуто можливі постановки задачі на вербальному рівні для вирішення конфліктних ситуацій вирішення міжгрупового конфлікту на прикладі координації інтелектуальних агентів вовчої зграї. Отримала подальший розвиток. Концепція та сама ідея врегулювання конфліктних ситуацій на основі математичного апарату в задачах моделювання та оптимізації використання ресурсних показників в контексті полі групової взаємодії агентів розподіленої інтелектуальної мережі на прикладі організації вовчої зграї; концепція пошуку ефективного рішення N-вимірної дилеми в'язнів. Наукова новизна. У даній роботі запропоновано вирішувати N-вимірну дилему в'язнів із використанням алгоритмічної методики контрольованого полі-групового конфлікту на основі метаевристичного алгоритму ройового інтелекту зграї сірих вовків (GWO). Модель алгоритму зграї сірих вовків стало можливим перенести на N-вимірну постановку задачі про дилему в'язнів завдяки тому, що здатність діяти окремого агента-вовка, як незалежного індивіда та впливати на загальний результат кооперації вовків однієї зграї і є прототипом моделі гри, котру уособлює собою «N-вимірна дилема в'язнів». Таким чином, кожен агент-вовк здатен впливати на рівень ефективності прийняття рішень вожаком його зграї, котрий уособлює собою гравця «N-вимірної дилеми в'язнів», котрий намагається максимізувати свій (зграї) виграш на площині пошуку рішень. Практичне значення. Запропоновані методи, моделі та методики можна використовувати в прикладних задачах економічного розрахунку ефективності підприємств, у задачах математичного моделювання пошуку балансу та ефективного розподілу ресурсів, в задачах пошуку та виявлення і оточення динамічних цілей в N-вимірних середовищах досягаючи ефективного показника фітнес-функції навіть на багато-екстремальних оптимізаційних функціях, в задачах ощадливого розподілу та споживання ресурсів. Висновки. Було виконано визначені у меті завдання та створено текстово-графічну технологію для подальшого формування математичної моделі вирішення задачі полігрупового конфлікту мультиагентної системи.

Ключові слова: ройовий інтелект, обчислювальний інтелект, стратегії управління, розподілені системи, боротьба за ресурси, управління конфліктом, N-вимірна дилема в'язнів, дослідження операцій, мультиагентні системи, методи оптимізації, вербальні моделі.

B. SKRYPKA, D. YELCHANINOV**MODELS AND METHODS FOR CONTROLLING MULTI-GROUP CONFLICTS OF INTEREST IN A MULTI-AGENT NETWORK ENVIRONMENT OF A DISTRIBUTED SYSTEM OF INTELLIGENT AGENTS**

If energy resources represent an excessive value for a group of agents of a distributed system, then a logical question arises: how to effectively allocate resources in order to satisfy the needs of each agent and to distribute them sparingly so as not to overexhaust reserves? Such a problem has a non-trivial solution. Our work is based on such models that were studied, inspired by the natural form of existence of group biological beings. The object is intelligent distributed systems. The subject is the process of self-organization of intelligent agents into a holistic distributed system that has common interests and the study of effective strategies for resolving emerging conflict situations between agents. Relevance of the work. Without energy resources, the existence of a particular biological species on the planet is impossible, and therefore the balance and distribution of energy is of key importance. Electricity is currently a scarce resource – the question of the priority of distribution between different groups of agents of a distributed network is a task not only for energy engineers, but also for mathematicians and economists. Water, human resources, mechanical means of shared use, etc. can act as a controversial or conflicting resource for several agents that need to be resolved. The goal of this work is to analyze and synthesize current knowledge on the topic of research into new approaches-strategies for organizing intelligent agents of distributed systems and to form ideas, hypotheses, observations and experimentally obtained data, methods and approaches for resolving conflict situations between agents into text-graphic technology for further formation of a mathematical model. The main idea consists in forming a new methodology-strategy for resolving multi-group conflict situations in distributed systems, which will potentially allow for the release and redirection of additional resources to achieve the ultimate goal. Methods used. Scientific experiment, analysis and synthesis, methods of comparison and analogy, modeling and prototyping method, abstraction and concretization, observations. Results obtained: scientific materials in the area of this research were analyzed and synthesized into local knowledge; an analysis of tactical and strategic methods for resolving conflict situations in the context of multi-agent systems was conducted; new knowledge was formed in the form of text-graphic technology; possible problem statements were considered at the verbal level for resolving conflict situations and resolving intergroup conflict using the example of coordination of intelligent agents of a wolf pack. Further developed. The concept and the very idea of resolving conflict situations based on the mathematical apparatus in the problems of modeling and optimizing the use of resource indicators in the context of multi-group interaction of agents

© Б. Ю. Скрипка, Д. Б. Єльчанінов, 2025

Вісник Національного технічного університету «ХПІ».

of a distributed intelligent network using the example of organizing a wolf pack; the concept of finding an effective solution to the N-dimensional prisoner's dilemma. Scientific novelty. In this work, it is proposed to solve the N-dimensional prisoner's dilemma using the algorithmic method of controlled multi-group conflict based on the metaheuristic algorithm of the swarm intelligence of a pack of gray wolves (GWO). The algorithm model of a pack of gray wolves has become possible to transfer to the N-dimensional formulation of the prisoners' dilemma problem due to the fact that the ability of an individual wolf agent to act as an independent individual and influence the overall outcome of cooperation of wolves in one pack is the prototype of the game model, which is represented by the "N-dimensional prisoners dilemma". Thus, each wolf agent is able to influence the level of decision-making efficiency of the leader of his pack, who represents the player of the "N-dimensional prisoners' dilemma", who tries to maximize his (the pack's) gain on the solution search plane. Practical significance. The proposed methods, models and techniques can be used in applied problems of economic calculation of enterprise efficiency, in problems of mathematical modeling of finding balance and effective allocation of resources, in problems of searching and identifying and surrounding dynamic goals in N-dimensional environments, achieving an effective fitness function indicator even on multi-extreme optimization functions, in problems of economical allocation and consumption of resources. Conclusions. The tasks specified in the objective were fulfilled and a text-graphic technology was created for the further formation of a mathematical model for solving the problem of polygroup conflict of a multiagent system.

Keywords: swarm intelligence, computational intelligence, control strategies, distributed systems, resource competition, conflict management, N-dimensional prisoners dilemma, operations research, multi-agent systems, optimization methods, verbal models.

Вступ. В контексті даної роботи наша увага зосереджена на структурі та взаємодії вовчої зграї, що в математичному контексті представлено оптимізаційним алгоритмом зграї сірих вовків (GWO), де вовча зграя спільно взаємодіє задля досягнення єдиної мети. Пропонується ускладнити базову модель алгоритмічної поведінки агентів-вовків та об'єднати зусилля N-зграй в одній операційній зоні, що очевидно, може дати, як позитивні так і негативні реакційні наслідки в силу конфлікту між зграями за території, де вони будуть спільно полювати на здобич задля виживання. В той же час буде використано апаратний механізм прототипування для спрощення більш складної моделі окремого вовка з метою дослідження визначених окремих частин поведінкових реакцій вовчої зграї та як одиниці дослідження поняття конфлікту інтересів між N-групами вовків розподіленої мультиагентної мережі.

Мета даної роботи: проаналізувати та синтезувати актуальні знання за тематикою дослідження у знання про підходи-стратегії організації та побудови мультиагентних структур пов'язаних у розподілені системи; розглянути та описово представити особливості поведінки агентів вовчої зграї у вигляді алгоритму керування спільними інтересами і потребами вовків-агентів в контексті складної мультиагентної системи, що являють собою комплексну мультиагентну структуру або інтелектуальну розподілену систему на основі обчислювального інтелекту; розглянути існуючі математичні моделі вирішення мультигрупових конфліктних ситуацій між людьми та сформувати базові стратегії протидії виникаючим конфліктним ситуаціям між інтелектуальними агентами розподіленої системи; графічно представити модель координаційно-незалежних між собою зграй вовків, кожна з яких мають свої ресурси та змагаються за персональні здобутки на одній площині доступних рішень задля максимізації виграшу; на основі попередньо проаналізованих та синтезованих знань про математичні моделі та особливості організації мультиагентних систем, запропонувати ідею для розв'язання N-вимірного мультигрупового конфлікту типу «N-вимірна дилема в'язнів» із використанням нового підходу на основі ройового інтелекту, а конкретніше на основі метавристичного алгоритму зграї сірих вовків (GWO).

Постановка проблематики задачі. Конфлікт інтересів, з точки зору математичного моделювання – є процесом змагання між N-групами агентів розподіленої системи за певний вид ресурсу або певну можливість-превілегію для окремого агента чи групи агентів такої системи над іншими учасниками. В контексті методів оптимізації перевага стратегії дії чи «кращий» показник окремого агента над іншим, визначається за рахунок числового показника, що обраховується в контексті математичної операції обчислення значення фітнес-функції на кожній алгоритмічній ітерації. Таким чином, ми маємо змогу аналітично оцінити вигоду того чи іншого агента-гравця складної економічної гри та максимізувати чи мінімізувати загальний показник ефективності взаємодії агентів єдиної мультиагентної системи.

Зазначимо, що в ідеальних умовах вся наявна енергія системи витрачається на потрібну роботу, але такі умови можна досягти лише в контексті лабораторного експерименту. В реалістичних же умовах, виникають супутні енергетичні втрати на той чи інший супутній фізичний процес чи на між-агентний конфлікт. За визначенням, будь-який конфлікт вимагає марнування енергетичних ресурсів на подолання перешкод суперника, що означає ще більшу витрату запасу енергії агента та зменшення кінцевої вигоди гравця N-вимірної гри і системи в цілому. Аналізуючи наукові матеріали [1-33], ми дійшли до гіпотези-висновку, що енергія конфлікту може бути використана не на змагання між собою, а на наближення загальної вигоди системи до максимального рівня шляхом розподілу завдань між окремими гравцями (зграями вовків в нашому випадку), що в кінцевому результаті може дати більший виграш всім гравцям, а отже і кінцевий розподіл ресурсів буде означати збільшення частки виграшу окремого гравця. Залишається визначити та зафіксувати правила такої гри, ціну одного ітераційного кроку гри та сформувати спеціальні стратегії вирішення конфліктів інтересів між N-агентами системи, та розглянути можливі сценарії дій у ситуаціях, коли окремі агенти не бажають направляти зусилля на досягнення спільної мети, а бажають загарбати усі ресурси одноосібно.

Також, висувається гіпотеза стосовно того, що описана ситуація ефективного розподілу та контролю за енергією конфлікту все ж можлива, а отже і стратегії-підходи для раціонального споживання ресурсів в

задачах математичного моделювання процесів суперництва N-агентів є сенс розглянути на предмет пошуку покращення-вдосконалення. Очевидно, що в разі успішного перенаправлення енергії на досягнення спільної мети та загальна кооперація розподіленої інтелектуальної мультиагентної системи, дасть нам змогу описати нову модель ощадливого розподілу та використання наявних ресурсів в певному контексті вирішуваної задачі математичного моделювання.

Описана проблематика є задачею не тривіальною навіть тому, що дія будь-якого з агентів системи впливає на інших агентів розташованих у даному просторі, а в силу динамічно-змінюваної обстановки, загальна координація агентів буде вимагати від нас і додаткових експериментів над чутливими налаштуваннями для генерації несуперечливої початкової точки старту. Зафіксуємо, що описана постановка проблеми не вимагає від нас пошуку точного рішення, а задовольняється умовою знаходження близького до оптимального рішення з урахуванням накладеної системи обмежень.

Поточний аналіз теоретичних матеріалів за тематикою дослідження. Джон Неш залишив багато наукових матеріалів в області теорії ігор та з пошуку оптимальних стратегій для гравців. З точки зору абстрактності, поставлена задача являє собою ускладнену модель вирішення «дилеми в'язнів», коли розглядається N-вимірний випадок, а кожен окремих гравець являє собою групу агентів, що направляють свої зусилля на свою локальну мету [1, с. 5].

Виникає дилема: яка з комбінацій гри буде вигадна для всіх гравців? А можливо такої комбінації зовсім не існує і краще об'єднати загальні зусилля для досягнення всіма групами агентів спільної мети, тут же питання, а як визначити спільну мету, коли кожна група агентів має свої вподобання, бажання, потреби і початкові енергетичні запаси? Задача не тривіальна, а для розуміння контексту та можливих напрямів руху у напрямку близького до оптимального рішення, першочергово розглянемо актуальні роботи послідовників Джона Неша, розглянемо класичну економічну задачу підприємства та фундаментальні роботи Елінора Остром про ефективне управління наявними ресурсами, роботи пов'язані із вирішенням зазначених задач іншими методами та практиками.

Розглядається класична економічна задача ефективного управління ресурсами підприємства. Ефективне управління підприємством є грою на пошук точки оптимуму або гра із перетягуванням повзунків в різні боки, де існує математична залежність між налаштуваннями різних параметрів системи балансу. Якщо таких повзунків умовно, менше 10 одиниць, то пошук оптимального балансу хоч і буде викликати деякі труднощі, але не надто, у порівнянні, коли конфігураційних налаштувань на підприємстві сотні. В такому випадку раціонально використовувати ефективні техніки оптимізації. У якості простого прикладу розглянемо спрощений процес виготовлення сталі, де виконується відсоткове змішування різних металевих включень для формування потрібного

хімічного складу та кристалічної решітки. Коли співвідношення збільшується чи зменшується у процентній частці сталі спеціальних компонент, як: молібден, кобальт, вольфрам, нікель та інші метали до загальної кристалічної решітки, то з'являється можливість регулювати твердість, в'язкість, крихкість та інші фізичні параметри продукції. Схожим чином формується і математична частина задачі, де вже проводиться розрахунок фітнес-функції у перерахунку на кількість доданих включень до ціни за умовну кількість речовини. Перенесемо спрощену математичну модель економіки підприємства на організацію вовчої зграї.

Розглядається модель економічного планування ефективного розподілу ресурсів з точки зору теорії ігор Джона Неша, як інструмента пошуку оптимальних стратегій та виявлення завідома програшних комбінацій ігор на прикладі вже вирішених задач. Класичною задачею виступає задача про «дилему в'язнів». Дана задача є такою моделлю, котра дасть нам уявлення про проблеми, котрі виникають в ході вирішення економічної задачі ефективного балансу оптимальних стратегій розподілу енергетичних ресурсів вовчої зграї.

У роботі [2] розглядаються оптимальні стратегії вирішення «дилеми в'язня» з новими схемами пошуку розв'язків на основі еволюційних комбінацій, а з іншого боку за посиланням [3] Рассел Дж. та Ксю К. наочно продемонстрували предметний приклад вирішення конфліктних ситуацій на основі теорії ігор між гравцями, котрі приймають рішення базуючись на адаптивних стратегіях відносно дій їх опонентів досягаючи таким чином загальної групової взаємодії на площині доступних рішень. В [4] розглядається сукупна інформація та нові погляди на класичну задачу про «дилему в'язня», котра представляє собою основу соціальної ієрархії будь-якого групового формування, яке має нерівності в соціальному статусі або має змагатися за певний вид ресурсу чи блага поміж іншими членами соціуму. В той же час матеріали [5], [6] демонструють стратегії розв'язання «дилеми в'язня» на основі дискретного часового процесу, в якому той чи інший гравець може припинити гру в будь-який час і тоді інший гравець має скоригувати свою стратегію. Робота [7] В. Жанга описує процес формування міжособистісних зв'язків та їх колективної кооперації з метою вирішення виникаючих конфліктів індивідуальних інтересів або вивчення ефективних стратегій взаємодії людей задля їх спільної взаємодії – це комплекс прийомів теорії ігор Джона Неша, а окремі математичні моделі, у даній роботі скомпоновано в методології, задля аналізу та кращого розуміння проблем соціальних процесів на прикладі китайського суспільства.

Природа певним чином навчилася вирішувати описані проблеми, тож звернемося до робіт, що були натхненні біологічними аспектами живої природи та в них були сформовані моделі використання мультиагентних систем у складі колективних формувань типу: зграя, рій, отара і т.п. Розглянемо

роботи про біологічні принципи формування колективного інтелекту.

Робота [8] описує еволюційні принципи та переваги взаємодії еволюційно-слабких агентів у спільні групи, над окремими сильними агентами. У роботі висвітлюється той факт, що хоч і слабкі агенти відповідно до теорії еволюції Дарвіна мали б вимерти, виживають і переважають сильних агентів у прямому зіткненні завдяки стратегії формування соціуму та внутрішній координації окремих примітивів ройової структури. А. Зольнокі та М. Перс показали, що використовуючи дану математичну модель для вирішення «дилеми в'язнів», можна побудувати ефективну мультипоточну схему взаємодії міжгрупової соціальної кооперації груп слабких агентів. У [9] М. Квон із колегами за допомогою алгоритмів генерації штучного хаосу та непередбачуваної еволюції на відрізку неперервного часу презентують переваги та недоліки міжагентної взаємодії, виходячи суто із раціональних показників та вибору вигравшій стратегій, що формуються на принципах вирішення задачі про «дилему в'язнів».

У роботі [10] Є. Бабенко представлено моделі метавристичної оптимізації: представлено інформаційну технологію аналізу біологічних процесів. Результати її роботи протестовано на класичних оптимізаційних проблемах, як подорожуючого торговця, складання рюкзака та інших проблемах, так і на класичних оптимізаційних функціях. Серед важливих результатів даної роботи, відзначено, що дослідження принципів формування та самоорганізації мультиагентних розподілених систем широко застосовуються для математичного моделювання, симуляції рекомендаційних та роботизованих систем. Тут же, в [10] зазначено недоліки використання такого підходу.

В контексті математичного моделювання логічним питанням постає, як визначити та яким потрібен бути рівень інтелектуальності у штучного агента інтелектуальної мультиагентної системи? У роботі [11], проводиться аналіз інформації та доводів стосовно того, наскільки мають бути «інтелектуальними» агенти в залежності від постановки задачі до математичного моделювання чи симуляції тої чи іншої форми мультиагентної моделі розподіленої системи на прикладі моделі полювання вовків на стадо овець. Робота базується і на стратегіях пов'язаних із «дилемою в'язнів». Для порівняння, робота [12] розглядає еволюційний підхід генетичного алгоритму для вирішення «дилеми в'язнів» на противагу до полювання зграєю вовків на стадо.

Маючи загальне уявлення про теорію ігор Джона Неша, розуміємо, що досягнення оптимального результату на площині дійсних локальних рішень потребує математичних розрахунків та поєднання системи накладання обмежень на матрицю варіативностей можливих дій гравців. Комбінація теорії Неша та математичні моделі оптимізаційних алгоритмів, котрими були натхнені дослідники природи – дають нам можливість симулювати складну алгоритмічну поведінкову форму, як рій чи зграя,

колонія тощо, на основі елементарних правил пересування та виконання дій чи перевірки стану агента. Нам відомо, що така форма існування окремих агентів «сам на сам» – в природі неможлива в силу їх слабкості до агресивного середовища, але їх колективна самоорганізація і є прикладом вирішення елементарних конфліктних ситуацій на рівні «потрібно вижити» та поєднати загальні зусилля задля досягнення спільної мети. Еленор Остром – Лауреат Нобелівської премії в області економіки, має наукові публікації, що слід звернути увагу для формування коректного світобачення на принципи організації соціальних структур типу мультиагентна система, яка є розподіленою інтелектуальною системою з агентами різного типу. Важливо розуміти стратегії та принципи прийняття рішень на шляху до пошуку ефективних рішень засобами мультиагентних систем.

Економічна теорія ефективного планування та використання ресурсів Еленор Остром отримала всесвітнє визнання та Нобелівську відзнаку за напрямок досліджень в економіці за фундаментальні істини. У роботі [13] Е. Остром та іншими розглядається типовий випадок, коли спільні пасовища чи ресурси використовуються безконтрольно, що призводить до надмірного виснаження та надмірного споживання. Натомість, автори зазначають, що було б ефективніше споживати ресурси ощадливо та керуватися колективними інтересами на основі спеціальних правил, беручи до уваги потреби інших агентів-гравців. Автори додають, що без спеціального агента-регулятора виконання правил користування спільним ресурсом буде майже неможливо, як і досягти точки оптимуму розподілу для повільно-відновлюваного обмеженого ресурсу.

У роботі [14] наводиться приклад різних типів агентів та механізмів врегулювання конфліктів, в [15] розглядаються складні моделі економічних систем, а у [16] наводяться ефективні прийоми організації агентів та звертається увага на загальні екологічні проблеми планети. В той час як у [17] досліджено соціальні моделі та взаємодію людей, у роботі [18] обговорюється обмежена кількість ресурсів системи та проблеми навколо дилеми «басейн ресурсів», та як ефективно провести масштабування і користування ресурсами на міжнародному рівні.

У фундаментальній роботі [19] Е. Остром наводиться низка прикладів про те, як користуватися спільними ресурсами разом на довірі та самоуправлінні без надмірного споживання багатьма агентами системи, базуючись на узгоджених діях без поняття приватизації та права власності на ресурси.

Мультиагентний підхід базується на окремих алгоритмах, що варто розглянути в контексті оптимізаційних та економічних задач ефективного планування розподілу та використання енергетичних ресурсів.

Розглядається область знань про обчислювальний інтелект, конкретніше – ройовий інтелект. Зосередимо свою увагу на евристичному алгоритмі зграї сірих вовків, котрий зарекомендував себе алгоритмом, що швидко і адаптивно підлаштовується до змін, а його

специфічні модифікації, що застосовуються залежно від постановки задачі, ефективно вирішують цілий спектр поставлених інженерно-практичних задач.

У роботі [20] розглядається приклад економічно-оптимізаційної задачі із накладеною системою обмежень під час пошуку оптимального балансу орендного житла. У роботі [21], Северин В. П., Нікуліна О. М. та інші, дослідили методи обчислювального інтелекту на предмет підвищення рівня їх адаптивності, точності, ефективності у вирішенні складних оптимізаційних задач, а за посиланням [22] проведено аналіз останніх наукових підходів в області мінімізації ризиків оптимізації моделі бізнес-процесів розподіленої системи управління. У роботі присутні концептуальні графічні нариси моделей інтелектуальних агентів ройового інтелекту, зокрема вовчої зграї.

За посиланням [23], Гринченко М. А. представила матеріал із підходами вирішення конфліктних ситуацій на проєктах між людьми. Зазначається, що конфліктні ситуації виникали між взаємодіючими агентами у зоні перетину діяльності або в зоні інтересу за певні матеріальні інтереси, в момент з'ясування соціального статусу агента, суперництво за виконання схожих завдань на спільній площині локальних рішень.

У роботі [24] наводиться приклад вирішення задачі розподілення енергетичних ресурсів системи оптимальним способом із використанням алгоритму зграї сірих вовків. В [25] описано мультистратегії застосування алгоритму зграї сірих вовків для пошуку глобального рішення у застосуванні до інженерних задач, а у [26] наводиться покращений варіант алгоритму зграї сірих вовків (Multi-group grey wolf optimizer – MIGWO) із використанням адаптивних вагових коефіцієнтів та прийому просторового навчання для пошуку глобального рішення на прикладі мульти-ройової взаємодії незалежних підгруп, як це відбувається в алгоритмі рою часток (Particle swarm optimizer – PSO). З іншого боку вченими у [27] розглянуто нову модифікацію рішення на основі комбінації підходів пошуку глобального та локальних рішень таких, як: CG (Chaotic game), GB (Gaussian barebone) та RS (random selection), а у фінальному варіанті така алгоритмічна сукупність представлена індексом CBRGWO. У матеріалі [28] розглядається детально підхід комбінованої еволюції двох евристичних алгоритмів ройового інтелекту – рою часток та зграї сірих вовків, а їм на противагу у [29] науковцями запропоновано оптимізаційна мульти-стратегія на основі модифікації алгоритму зграї сірих вовків із випадковим напрямом руху, визначенням напрямку локального пошуку та формуванням підгруп із різними пороговими значеннями фітнес-функції.

У роботі [30] розглянуто модель фреймворку для планування надзвичайних ситуацій із застосуванням безпілотних літаючих апаратів, особливостями роботи є визначення оптимальних розмірів флоту рятувальної місії, мінімізація витрат на місію та часу постановки задач до виконання за рахунок впровадження модифікаційних рішень на основі алгоритму зграї сірих вовків (GWO), а робота [31] зосереджена на тому, як

ввести систему обмежень під час планування оптимізаційного процесу на прикладі алгоритму ройового інтелекту рою часток (PSO), що може бути ефективно використано у реалізації модифікаційних рішень на основі алгоритму зграї сірих вовків, також.

Результати дослідження. В контексті даного дослідження розглядається оптимізаційне управління мультигруповою поведінкою інтелектуальних розподілених систем на прикладі організації мультигрупової поведінки зграї сірих вовків з перенесенням проєкції соціальної структури людей на ієрархію вовків. Планується застосовувати прийом моделювання та зафіксуємо той факт, що будь-яке виконуваче агентом завдання – є пошуком локального рішення на шляху до досягнення спільної мети, що ми називатимемо глобальним рішенням або близьким до такого одне із локальних рішень, яке задовольняє встановленим критеріям зупинки ітераційного оптимізаційного процесу.

Моделюється задача оптимізаційного управління мультигруповою поведінкою агентів в контексті розподіленої інтелектуальної системи на основі алгоритму зграї сірих вовків (GWO). Розглядається випадок, де інтелектуальна складова такої системи базується на обчислювальному інтелекті: правилах природної еволюції і алгоритмах ройового інтелекту. Досліджується та аналізується проблематика моделювання алгоритму зграї вовків з метою подальшого розвитку ідеї алгоритмічного відтворення тактико-стратегічних механізмів групових видів в розподілених інтелектуальних системах із використанням мультигрупового підходу та ефективним вирішенням конфліктних ситуацій.

Розглянемо характерні причини міжвидових конфліктів інтересів. У природі, міжгруповий конфлікт інтересів поміж зграй вовків найчастіше виникає навколо обмежених ресурсів: їжа, вода, території, котрі є енергетичними джерелами або ареалом для полювання зграї. Зафіксуємо поняття «енергія конфлікту» – це ресурси (основним ресурсом для моделі вовчої зграї є харчові калорії та вода), що змарновано із негативними наслідками та негативним результатом на загальний енергетичний баланс розподіленої системи, що моделюється, і такі ресурси, що були витрачені на міжвидову боротьбу агентів за незначну частку вигоди чи взагалі її відсутність в результаті завершення активної фази вирішення міжгрупового конфлікту інтересів.

Розглянемо поняття «комбінована кругова діаграма оцінки міжгрупових конфліктних інтересів», далі в роботі для зручності будемо використовувати скорочення повної назви до «діаграма конфліктів». Візуалізацію діаграми конфліктів продемонстровано на рис. 1. Діаграма-рисунок відображає N-груп (в даному випадку зграй вовків) інтелектуальних агентів, кожна з яких включає від одного агента, використаємо діаграму конфліктів для графічного моделювання мультиагентних зв'язків. Дане поняття-діаграма уособлює в собі діаграму кругових елементів, котрі зображені у вигляді кругового об'єкта. Діаграма,

зображена на рис. 1, графічно демонструє кількість зв'язків між зграями вовків та дає можливість провести оцінку кількості наявних конфліктів інтересів між зграями, шляхом підрахунку числа попарних перетинів відповідних кругових об'єктів.

Важливо зазначити те, що пропонується використовувати пропорційний розмір кругового об'єкта до запасів його ресурсів, що в процесі моделювання виражається початково-заданим числовим показником-характеристикою окремого агента вовка та акумулюється в загальну суму для всієї зграї.

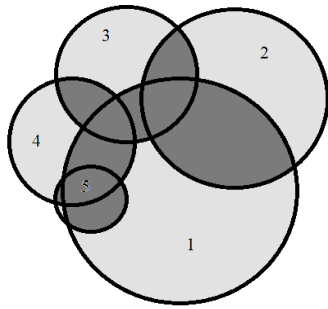


Рис. 1. Діаграма конфліктів. Приклад складної діаграми міжгрупового конфлікту інтересів окремих зграй вовків

Розглядаючи рис. 1, бачимо, що окрім відмінних розмірів кругових об'єктів, присутні різні площі попарного перетину між деякими із них. Згідно поняття діаграми конфліктів, більша чи менша площа попарного перетину об'єктів, пояснюється відповідним числовим показником, що розраховується, як число для оптимізаційної фітнес функції, котру ми маємо на меті звести до мінімуму, що буде означати відсутність конфлікту тої чи іншої зграї з іншою за ресурси. Пропонується використовувати шкалу для «показника конфліктності», у вигляді числового значення у формі десяткового числа, котре лежить на проміжку від 0 до 1 та включає крайні значення, де 0 означає відсутність будь-яких конфліктів за спільні ресурси чи інтереси, 1 – це повне співпадіння конфліктних інтересів та необхідність пошуку стратегії вирішення конфлікту зграй, а число на проміжку більше 0 і менше 1 – це часткове співпадіння інтересів зграй. У відповідності до розміру початкових енергетичних ресурсів однієї зграї та іншої, що конфліктують, і буде залежати обрана стратегія вирішення конфлікту окремим інтелектуальним модулем на основі теорії прийняття рішень. Варто зазначити, що комплексні випадки множинного попарного перетину на діаграмі конфліктів інтересів потрібно вирішувати поступово і відслідковувати циклічності в процесі моделювання за допомогою матриці відстаней між центрами інтересів зграй. На даному етапі дослідження пропонується проводити поетапні оцінювання задля не допущення спотворення вхідних даних, жертвуючи швидкістю паралельного опрацювання вхідної інформації. Очевидно, що для аналітичної оцінки людиною число 0.74 або 0.7345 буде означати два дуже близьких по значенню числа, але в контексті вирішуваної задачі, такі числа можуть кардинально впливати на загальну стратегію

оптимізаційного процесу, особливо у випадку складання залишкових часток для коректного прийняття рішення, яку саме стратегію вирішення конфлікту обрати. Наведемо уявний приклад-представлення у вигляді вербальної моделі із переводом у шкалу, зрозумілу людині, як буде виглядати кінцевий висновок аналізу інтелектуальним модулем отриманих даних з діаграми конфліктів, замість числових показників: конфлікт відсутній, сторони знайшли шляхи вирішення конфлікту, конфліктують та витрачають енергетичні ресурси не ефективно, пристосувалися один до одного тощо. Питання: як зручно представити набір інтересів кожного з агентів-вовків – у вигляді одинарного вектора-матриці, для мінімізації використання пам'яті та покоміркового налаштування початкової точки мультиагентної системи.

Розглянемо діаграму конфліктів з точки зору методів оптимізації. На області визначення знаходяться N-зграй (груп) вовків, інтереси кожної з груп та їх конфлікт-перетин інтересів у вигляді поелементних перетинів кругових елементів діаграми зображено на рис. 1. Розглянемо рис. 1 для аналізу наявних на ній зон конфлікту інтересів. Початкова точка була сформована експериментально підбором параметрів-налаштувань. Система обмежень підібрана так, щоб зграя вовків пересувалася в межах визначеного ареалу проживання, а кількість здобичі розміщено неоднорідно. Ареали проживання агентів динамічно-змінювані зі встановленими швидкостями.

Діаграма конфліктів з точки зору складної економічної гри на виживання, де описана початкова точка, налічує N-зграй вовків, котрі в даному контексті виступають «гравцями», та окремі види травоядних тварин: зайці, дикі кози, олені – має на меті пошук методів кооперації зграй вовків задля досягнення спільної мети та ощадливого користування енергетичними ресурсами, котрі мають можливість закінчуватися з однією швидкістю та відновлюватися з меншою чи більшою швидкістю в залежності від ареалу проживання та кількості загроз для них [19]. З точки зору економіки підприємства – оптимізаційна фітнес-функція доповнюється пошуком балансованого стану «споживання-відновлення» енергетичних ресурсів. З точки ж зору теорії ігор, зафіксуємо те, що в нашому випадку окремий гравець, котрий виступає у пошуках вигірної комбінації є групою вовків (зграєю), а окремий вовк – інтелектуальним агентом розподіленої системи. Описана сукупна модель є K-вимірним прикладом задачі типу «дилема в'язнів», де ми маємо K-вимірність у тому розумінні, що кожному гравцю такої гри доступно по L доступних стратегій дій, котрі можуть бути розширені чи звужені в ході процесу навчання інтелектуального модуля на динамічно-змінюваних даних [32-33].

Описана модель являє собою складну мультиагентну розподілену інтелектуальну систему, що направлена на ефективне вирішення конфліктних мультиагентних ситуацій. Також, запропонована модель на основі N-вимірної задачі про дилему в'язнів на основі ройового алгоритму зграї сірих вовків є

новим підходом до вирішення, як для самої N-вимірної задачі дилеми про в'язнів, так і універсальною стратегією пошуку вигравшних стратегій для різних типів вирішуваних задач.

Для простоти демонстрації представленої ідеї оптимізаційної моделі, що є комбінацією методів оптимізації, теорії ігор, економіки підприємства та ройового інтелекту – розглянемо одну із окремих ітерацій загального оптимізаційного процесу вирішення конфлікту енергетичних інтересів зграї вовків на діаграмі конфліктів, що зображена на рис. 2.

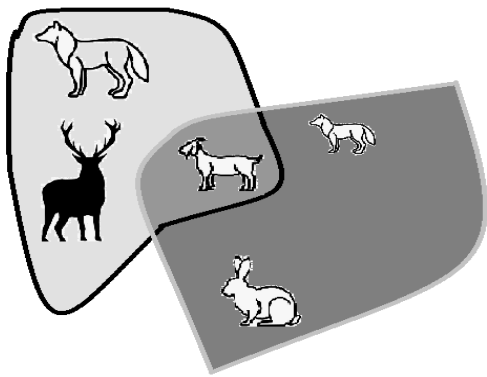


Рис. 2. Конфлікт інтересів між зграями вовків за ресурси

На рис. 2 можна побачити, що два окремих ареали проживання вовчих зграй (вони ж гравці економічної задачі моделювання підприємства на виживання) співіснують на спільній території та мають ненульову площу перетину зон їх ареалів проживання. Відповідно до поняття про діаграму конфліктів та області допустимих значень для цифрового показника, розуміємо, що ненульова площа перетину на діаграмі конфліктів, означає наявність невирішеного конфлікту за енергетичні ресурси. Групи вовків, котрі кожна можуть діяти абсолютно по-різному та реагувати, так само відмінно на входні сигнали, мають свої потреби, що було задано конфігураційно із початковою точкою. Проаналізуємо дану ситуацію та опишемо можливі стратегії вирішення оптимізаційної задачі, що в даному випадку вирішується словесно.

Завдання – пошук оптимальних або прийнятних розв'язків на площині доступних рішень шляхом ефективного розподілу та збалансованого користування енергетичними ресурсами між зграями вовків і їх окремими агентами розподіленої системи із використанням адаптивних стратегій вирішення конфліктів інтересів.

Оптимізаційна функція визначається мінімізацією конфліктних ситуацій за ареал проживання і ресурси харчування, пошук мінімального енергетичного балансу між учасниками мультиагентної системи, що означає зменшення площі попарного перетину між зграями вовків за умови, що їх спільна діяльність не покращує загальний результат у вигляді взаємодопомоги. Описана модель оптимізаційної задачі є складною, а сама постановка є багатокритеріальною оптимізаційною задачею. Для словесного вирішення поставленої задачі

використовуються методи: порівняння та аналогій, аналізу та синтезу, спланований експеримент.

Пошук ефективної стратегії самоорганізації та взаємодії між групами-зграями вовків: розглядається ідея алгоритмічної самоорганізації зграй вовків, коли дві або більше координаційно незалежних зграй вовків, що мають кожна свої інтереси та ненульову площу перетину в зоні конфліктів інтересів, виконують спільне завдання ефективно вирішивши конфлікт інтересів. В контексті моделювання, з одного боку представлена модель є суперечливою за визначенням, а з іншого як модель-прототип має право на існування для створення роботизованих чи безпілотних автономних груп пошуку та порятунку в надзвичайних ситуаціях, під час розподіленої координації загонів. Однією з ефективних стратегій в такій ситуації може виступати спостереження за складом та оцінка кількості за розміром зграї супротивника, з метою проведення аналітичної оцінки вірогідності успішності прямого зіткнення-конфлікту чи необхідність пошуку обхідних шляхів поодинокого оточення окремих агентів іншої зграї, пошуку можливості ефективних «переговорів» в контексті комп'ютерного моделювання з метою ефективного використання усіх наявних ресурсів зграй. У той же час потрібно розуміти, що протилежна до мирного врегулювання та спільної координації – є стратегія «прямого зіткнення зграй для з'ясування переваги силою» між такими, як це в природі часто буває під час з'ясування права на полювання на певній території хижаками. Така стратегія вимагає витрати харчових ресурсів зграй не на спільне полювання, а в більшій мірі на міжвидову ворожнечу поміж «зграями вовків», що ми називаємо «без цільове марнування ресурсів». В ході вирішення конфлікту за методом зіткнення в результаті буде з'ясовано одноосібну зграю-переможця, але ця зграя зазнає значних втрат ресурсів, як серед агентів, так і серед харчових. Здобутки ж при виборі такої стратегії можуть бути меншими, ніж вона першочергово це очікувала, чи за ті, що вона мала до початку конфліктної ситуації.

Аналізуючи та досліджуючи описані стратегії вирішення конфліктних ситуацій між незалежними зграями, вірною виступає стратегія відсутності прямого «зіткнення», яка в кінцевому результаті дасть зграям змогу не тільки збільшити рекреаційний потенціал для відновлення популяції травоядних, а і зграї зможуть полювати на більшу кількість видів тварин одночасно, маючи в своєму запасі, як більше харчових ресурсів, так і підвищену вірогідність успішного відбиття атаки від інших зграй за рахунок згуртованості із іншою зграєю (рис. 2).

Розглядається наступна найпростіша постановка задачі моделювання, коли дві координаційно незалежні групи вовків, що полюють на одній території одночасно – конфліктують за здобич. Кожну зграю направляє свій вожак, але здобич – одна на дві зграї, що і є причиною конфлікту. У природніх умовах спільна здобич на полюванні визвала би суперечку, але в контексті комп'ютерного моделювання постають цікаві гіпотези, ідеї, котрі мають право на існування.

Пропонується ідея модифікації моделювання поведінки алгоритму зграї сірих вовків, коли вовки, в межах своєї зграї діють як незалежні інтелектуальні агенти, та мають видові характеристики та здібності, як розподілений обмін інформацією. Це означає, що дві незалежні зграї вовків можуть одночасно виконувати пошук стратегії успіху полювання на здобич паралельно та розподілено обмінюватися інформацією між суміжними агентами незалежних зграй в реальному часі. Дане поняття представляє собою механізми різнобічної синхронізації та обміну інформацією між агентами розподіленої системи, їх покращену адаптацію за рахунок міжагентного обміну інформацією на місцевості в режимі реального часу та можливості паралельно виконувати поставлені задачі.

Для розрахунку продуктивності окремого агента-вовка, пропонується використовувати окремий якісно-числовий показник, котрий обчислюється в залежності від контекстно-залежних параметрів-характеристик та налаштувань системи.

Алгоритмічно дане поняття «контрольованого конфлікту інтересів» можна представити, як процес або алгоритмічний механізм, коли мультиагентна розподілена взаємодія направлена на виконання спільної задачі, як це показано на рис. 3.

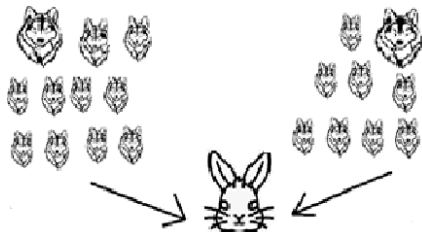


Рис. 3. Контрольований полігруповий мультиагентний конфлікт інтересів зграй вовків під час полювання на здобич

У спланованих тестових експериментах із моделювання контрольованого конфлікту інтересів підтверджено, що такий механізм моделювання дозволяє нам відтворити описаний підхід в силу спрощеності моделі агента-вовка та накладання К-розмірної кількості ігрових стратегій окремої зграї на динамічну обстановку зграй вовків, котрі можуть одночасно «полювати». В ході аналізу складностей та специфіки поставленої задачі оптимізаційного управління, нами було проаналізовано переваги і недоліки використання евристичного алгоритму ройового інтелекту класу стохастичної оптимізації типу зграї сірих вовків (GWO) на окремих задачах вирішення складних практичних проблем із використанням мультигрупового підходу комп'ютерного моделювання для ефективного розподілу поставлених групам задач. Під час формування інформаційної моделі, ми визначили, що можна ефективно відокремити і розподілити завдання з розвідки місцевості, інтелектуального пошуку та розпізнавання цілей, пошуку вразливих місць здобичі та вичікування вдалого моменту для полювання, оточення і полювання на здобич, колізії, механізм організації обчислень – на незалежні завдання. Перелічені вище завдання група інтелектуальних

агентів здатна виконувати одночасно (паралельно) або послідовно (синхронно або асинхронно), в залежності від конфігураційно-заданих параметрів із налаштуваннями або в залежності від вибору конфліктно-узгодженого ступеня самоорганізації комп'ютерної моделі вовчих зграй.

Так як, описана інформаційно-поведінкова модель вовчої зграї – це абстракція-проекція і перенесення тактик та стратегій поведінки вовків під час полювання у природі світ комп'ютерного моделювання, то дана модель може бути використана під час вирішення актуальної для України та світу, задачі ефективного розподілу і користування обмеженими енергетичними ресурсами. Доведемо актуальність та практичну значимість описаної моделі на прикладній постановці задачі ефективного управління підприємствами генерації електроенергії. В даному контексті «вовчі зграї (рис. 3)» – це користувачі електромереж, їм необхідна енергія для виживання в економічному (господарчі підприємства, громадяни) та фізичному (лікарні з пацієнтами) сенсі тощо, «популяція травоядних тварин (рис. 3)» – це саме генеруючі потужності електроенергії, котрі в свою чергу споживають паливну та відновлювану ресурсу бази, що є вугіллям, ураном, нафтопродуктами, вітрова енергія, енергія сонця, гідроенергія тощо (в контексті описуваної моделі вовчої зграї – це природна кормова база травоядних).

За умови ефективного перетворення одного виду ресурсу в інший маємо змогу налагодити ефективну мультиагентну кооперацію, а отже і можливість балансувати ділянки розірваної системи електропостачання. Зазначимо, що пошук стану балансу можливий за умови раціонального користування паливно-відновлюваної ресурсної бази на генеруючих потужностях та ощадливого користування кінцевими споживачами електроенергії, так як сильні та часті коливання співвідношення «генерація-споживання», вимагають постійного пошуку нової точки оптимального рішення. В силу того, що запаси паливних ресурсів в умовах географічного розташування окремих держав можуть бути малими або логістичні шляхи постачання надто довгими – це призведе до необхідності вирішення виникаючих конфліктних ситуацій за паливні ресурси для генеруючих потужностей всередині одного виду агентів (модель: зграя вовків на полюванні). Виникає додаткова задача-проблема, котра має бути ефективно вирішена із використанням вигравшних стратегій та накладенням обмеження у вигляді пріоритетності подачі ресурсу для тої чи іншої зграї вовків чи визначеного агента-вовка (лікарня, транспортна інфраструктура, опалювальні мережі тощо). Описана графічна модель представлена на рис. 1-2.

Як інший приклад практичної значимості, описана модель може виступати в контексті ефективного розподілу наявних ресурсів між об'єднаними L-зграями вовків на шляху до спільної мети для відбиття загрози з боку зграї інших вовків, що намагається витратити ресурси не ефективно на міжвидовий

конфлікт, в протиставленні ефективному – пошук балансу ресурсної системи між зграями.

Не вирішені в ході дослідження завдання. В ході даного дослідження нами не було вирішено задачу комп'ютерного програмування описаних стратегій та методів мультиагентних конфліктів інтересів; не вирішено завдання розробки мультипоточних та розподілених алгоритмів для запропонованих моделей та методів; не вирішено завдання автоматизації відображення графічним способом діаграми конфліктів інтересів; не вирішено завдання знаходження площі перетину конфліктів інтересів графічним способом в реальному часі; не вирішено завдання автоматизованого процесу комп'ютерної симуляції оптимізаційного процесу ефективного вирішення конфліктних ситуацій між агентами за ресурси; не розроблено математичну модель оптимізаційного процесу вирішення прикладної задачі математики на основі отриманої інформаційно-текстової та графічної технології.

Перспективи розвитку роботи.

Використовуючи отримані в даному дослідженні результати, нами у майбутньому планується розвинути теоретичну та практичні частини, а за можливості реалізувати відповідні математичні та комп'ютерні моделі, котрі стосуються графічних методів та візуалізації оптимізаційного процесу на основі запропонованих моделей та методів, стратегій контролю полігрупових конфліктів інтересів у розподілених мультиагентних системах.

Висновки. У роботі отримало подальший розвиток поняття моделювання аспектів «контрольованого полігрупового мультиагентного конфлікту інтересів», як тактико-стратегічного прийому у цілісному оптимізаційному процесі комп'ютерного моделювання вовчої зграї на площині пошуку рішення із застосуванням ощадливого механізму регуляції споживання доступних ресурсів та пошуку ефективних стратегій дій на основі «К-вимірної задачі дилеми в'язнів».

Було запропоновано чи вдосконалено існуючі моделі та методи, підходи і стратегії дій, а відповідні знання було сформовано у вигляді інформаційно-текстової технології. Також, у даній роботі запропоновано окремі тактико-стратегічні поведінкові прийоми в тих чи інших конфліктних ситуаціях та шляхи їх вирішення, а для кращого розуміння та наочності демонстрації ідеї – додано окремі графічні матеріали: рисунки та діаграми.

Було розглянуто модель поведінки декількох груп-зграй вовків із описанням механізму параметрично-контрольованої конкуренції між ними в контексті єдиного процесу полювання.

У задачі економіки підприємства на виживання використано розширення поняття про комбіновану кругову діаграму оцінки міжгрупових конфліктних інтересів задля якісно-кількісної оцінки показників ефективності оптимізаційних процесів, котрі подано у

якості ідеї розрахунку продуктивності окремого агента-вовка із використанням якісно-числового показника.

У роботі проаналізовано та синтезовано наукові матеріали області даного дослідження в локанічній знання для їх поетапного перебору та пошуку місць для покращення роботи вже відомих алгоритмів прикладного застосування, застосовуючи алгоритм зграї сірих вовків (GWO). Було проведено аналіз тактико-стратегічних прийомів вирішення конфліктних ситуацій між біологічними агентами, проаналізовано матеріали визначення та ефективного прийняття рішень задля максимізації виграшу, беручи за основу фундаментальні роботи Д. Неша та Е. Остром та інших дослідників теорії ігор та економіки, методів оптимізації, що працювали над вирішенням проблеми користування спільними ресурсами.

Було сформовано знання у вигляді кінцевої текстово-графічної технології про моделі та методи, стратегії ефективного вирішення міжгрупового конфлікту на прикладі координації інтелектуальних агентів вовчої зграї у вигляді текстової інформації, рисунків та діаграм.

Список літератури

1. Guerra-Pujol F. E. The parable of the prisoners. *SSRN electronic journal*. 2013. P. 39. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2281593> (date of access: 14.01.2026).
2. Bravetti A., Padilla P. An optimal strategy to solve the Prisoner's Dilemma. *Scientific reports*. 2018. Vol. 8(1). URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20426-w> (date of access: 24.11.2025).
3. Russell J. E., Xu X. The Prisoner's Dilemma game as a tool to investigate cooperation and undergraduate education in evolution. *Evolution: education and outreach*. 2024. Vol. 17, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s12052-024-00205-0> (date of access: 24.11.2025).
4. Johnson T., Salahshour M. Seventy-five years later, the prisoner's dilemma narrative continues to impart new wisdom. *Europhysics letters*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1209/0295-5075/ae20bb> (date of access: 24.11.2025).
5. Emergence of synchronization induced by the interplay between two prisoner's dilemma games with volunteering in small-world networks / Y. Chen et al. *Physical review E*. 2008. T. 77, № 3. URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.77.032103> (date of access: 24.11.2025).
6. Kôno N. On a non-symmetric repeated prisoner's dilemma game in which (all d, all c) strategy is the best Nash equilibrium for one player. *Transactions of the operations research society of japan*. 2017. V. 60. P. 100–112. URL: <https://doi.org/10.15807/torsj.60.100> (date of access: 24.11.2025).
7. Zhang W. The prisoner's dilemma and the Nash equilibrium. *Game theory and society*. 2017. P. 31–57. URL: <https://doi.org/10.4324/9780203701584-2> (date of access: 24.11.2025).
8. Szolnoki A., Perc M. Evolutionary dynamics of cooperation in neutral populations. *New journal of physics*. 2018. V. 20, no. 1. P. 013031. URL: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/aa9fd2> (date of access: 24.11.2025).
9. Chaos and unpredictability in evolution of cooperation in continuous time / T. You et al. *Physical review E*. 2017. V. 96, no. 6. URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.96.062310> (date of access: 24.11.2025).
10. Babenko Y. Bioinspired models for metaheuristic optimization. *TechRxiv*. 2025. P. 1–25. URL: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.175693302.22402426/v1> (date of access: 24.11.2025).
11. Fioretti G., Policarpi A. The less intelligent the elements, the more intelligent the whole. or, possibly not?. *SSRN electronic journal*.

2020. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3699365> (date of access: 24.11.2025).
12. Exploiting evolutionary modeling to prevail in iterated prisoner's dilemma tournaments / M. Gaudesi et al. *IEEE transactions on computational intelligence and AI in games*. 2016. V. 8, no. 3. P. 288–300. URL: <https://doi.org/10.1109/tciaig.2015.2439061> (date of access: 24.11.2025).
 13. Rules, games, and common-pool resources. / A. Hamlin et al. *The economic journal*. 1995. V. 105, no. 431. P. 1034. URL: <https://doi.org/10.2307/2235179> (date of access: 24.11.2025).
 14. Ostrom E. Collective action and the evolution of social norms. *Journal of economic perspectives*. 2000. V. 14, no. 3. P. 137–158. URL: <https://doi.org/10.1257/jep.14.3.137> (date of access: 24.11.2025).
 15. Ostrom E. Beyond markets and states: polycentric governance of complex economic systems. *American economic review*. 2010. V. 100, no. 3. P. 641–672. URL: <https://doi.org/10.1257/aer.100.3.641> (date of access: 24.11.2025).
 16. Dietz T. The struggle to govern the commons. *Science*. 2003. V. 302, no. 5652. P. 1907–1912. URL: <https://doi.org/10.1126/science.1091015> (date of access: 24.11.2025).
 17. Complexity of coupled human and natural systems / J. Liu et al. *Science*. 2007. V. 317, no. 5844. P. 1513–1516. URL: <https://doi.org/10.1126/science.1144004> (date of access: 24.11.2025).
 18. Ostrom E. Revisiting the commons: local lessons, global challenges. *Science*. 1999. V. 284, no. 5412. P. 278–282. URL: <https://doi.org/10.1126/science.284.5412.278> (date of access: 24.11.2025).
 19. Field B. C., Ostrom E. Governing the commons: the evolution of institutions for collective action. *Land economics*. 1992. V. 68, no. 3. P. 354. URL: <https://doi.org/10.2307/3146384> (date of access: 24.11.2025).
 20. Lozinska A., Lobach O. Development of the information system for solving the problem of renting and buying housing in the Netherlands with the introduction of a contextual search algorithm: personalized and accelerated selection of real estate. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: strategic management, portfolio, program and project management*. 2025. No. 2(9). P. 62–68. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2024.9.9> (date of access: 24.11.2025).
 21. Analysis of computational intelligence methods for modeling, identification, optimization of systems and decision support / O. Kondratov et al. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: strategic management, portfolio, program and project management*. 2025. No. 2(9). P. 35–44. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2024.9.5> (date of access: 24.11.2025).
 22. Danchenko O., Semko A. Development of an anti-risk method of optimizing business processes. *Bulletin of the NTU "KhPI". Series: strategic management, portfolio, program and project management*. 2023. No. 1(7). P. 27–34. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2023.7.4> (date of access: 24.11.2025).
 23. Conflicts in project management / M. Grinchenko et al. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: strategic management, portfolio, program and project management*. 2022. No. 1(5). P. 50–55. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2022.5.6> (date of access: 24.11.2025).
 24. Hierarchical multi step Gray Wolf optimization algorithm for energy systems optimization / I. Dagal et al. *Scientific reports*. 2025. V. 15, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92983-w> (date of access: 24.11.2025).
 25. Multi-Strategy grey wolf optimization algorithm for global optimization and engineering applications / L. Wang et al. *Journal of systems science and systems engineering*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s11518-024-5622-z> (date of access: 24.11.2025).
 26. Multi-swarm improved Grey Wolf Optimizer with double adaptive weights and dimension learning for global optimization problems / S. Ma et al. *Mathematics and computers in simulation*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2022.10.007> (date of access: 24.11.2025).
 27. Multi-strategy grey wolf optimizer for engineering problems and sewage treatment prediction / C. Tang et al. *Advanced intelligent systems*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1002/aisy.202300406> (date of access: 24.11.2025).
 28. A hybrid multi-group co-evolution intelligent optimization algorithm: PSO-GWO / Z. Li et al. 2021 IEEE international conference on electrical engineering and mechatronics technology (ICEEMT), Qingdao, China, 2–4 Jul. 2021y. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/iceemt52412.2021.9601716> (date of access: 24.11.2025).
 29. Multi-Objective grey wolf optimizer based on improved head wolf selection strategy / Z. Zhang et al. 2024 43rd Chinese control conference (CCC), Kunming, China, 28–31 Jul. 2024 y. 2024. P. 1922–1927. URL: <https://doi.org/10.23919/ccc63176.2024.10662658> (date of access: 24.11.2025).
 30. A two-stage optimization framework for UAV fleet sizing and task allocation in emergency logistics using the GWO and CBBA / Y. Zhang et al. *Drones*. 2025. Vol. 9, no. 7. P. 501. URL: <https://doi.org/10.3390/drones9070501> (date of access: 28.11.2025).
 31. Dao S. D. Particle swarm optimization (PSO) for constrained optimization problems. *Learn With Panda*. URL: <https://learnwithpanda.com/2020/05/19/particle-swarm-optimization-pso-for-constrained-optimization-problems/> (date of access: 24.11.2025).
 32. Glynatsi N. E., Knight V., Harper M. Properties of winning iterated prisoner's dilemma strategies. *PLOS computational biology*. 2024. T. 20, № 12. C. e1012644. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1012644> (date of access: 24.11.2025).
 33. Szilagyi M. N. An investigation of n-person prisoners' dilemmas. *Complex systems*. 2024. Vol. 14, no. 2. P. 155–174. URL: <https://doi.org/10.25088/complexsystems.14.2.155> (date of access: 26.11.2025).

References (transliterated)

1. Guerra-Pujol, F. E., (2013). The parable of the prisoners. *SSRN electronic journal* [online]. P. 39. Available from: doi: 10.2139/ssrn.2281593 (date of access: 14.01.2026).
2. Bravetti, A. and Padilla, P., (2018). An optimal strategy to solve the Prisoner's Dilemma. *Scientific Reports* [online]. No. 8(1). Available from: doi: 10.1038/s41598-018-20426-w (date of access: 24.11.2025).
3. Russell, J. E. and Xu, X., (2024). The Prisoner's Dilemma game as a tool to investigate cooperation and undergraduate education in evolution. *Evolution: Education and Outreach* [online]. No. 17(1). Available from: doi: 10.1186/s12052-024-00205-0 (date of access: 24.11.2025).
4. Johnson, T. and Salahshour, M., (2025). Seventy-five years later, the prisoner's dilemma narrative continues to impart new wisdom. *Europhysics Letters* [online]. Available from: doi: 10.1209/0295-5075/ae20bb (date of access: 24.11.2025).
5. Chen, Y., Qin, S.-M., Yu, L. and Zhang, S., (2008). Emergence of synchronization induced by the interplay between two prisoner's dilemma games with volunteering in small-world networks. *Physical Review E* [online]. No. 77(3). Available from: doi: 10.1103/physreve.77.032103 (date of access: 24.11.2025).
6. Kôno, N., (2017). On a non-symmetric repeated prisoner's dilemma game in which (all d, all c) strategy is the best Nash equilibrium for one player. *Transactions of the Operations Research Society of Japan* [online]. No. 60, pp. 100–112. Available from: doi: 10.15807/torsj.60.100 (date of access: 24.11.2025).
7. Zhang, W., (2017). The prisoner's dilemma and the Nash equilibrium. In: *Game theory and society* [online]. Routledge. pp. 31–57. Available from: doi: 10.4324/9780203701584-2 (date of access: 24.11.2025).
8. Szolnoki, A. and Perc, M., (2018). Evolutionary dynamics of cooperation in neutral populations. *New Journal of Physics* [online]. No. 20(1). Available from: doi: 10.1088/1367-2630/aa9fd2 (date of access: 24.11.2025).
9. You, T., Kwon, M., Jo, H.-H., Jung, W.-S. and Baek, S. K., (2017). Chaos and unpredictability in evolution of cooperation in continuous time. *Physical Review E* [online]. No. 96(6). Available from: doi: 10.1103/physreve.96.062310 (date of access: 24.11.2025).
10. Babenko, Y., (2025). Bioinspired models for metaheuristic optimization. *TechRxiv* [online]. P. 1–25. Available from: doi: 10.36227/techrxiv.175693302.22402426/v1 (date of access: 24.11.2025).
11. Fioretti, G. and Policarpi, A., (2020). The less intelligent the elements, the more intelligent the whole. or, possibly not? *SSRN*

- Electronic Journal* [online]. Available from: doi: 10.2139/ssrn.3699365 (date of access: 24.11.2025).
12. Gaudesi, M., Piccolo, E., Squillero, G. and Tonda, A., (2016). Exploiting evolutionary modeling to prevail in iterated prisoner's dilemma tournaments. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games* [online]. No. 8(3), P. 288–300. Available from: doi: 10.1109/tciaig.2015.2439061 (date of access: 24.11.2025).
 13. Hamlin, A., Ostrom, E., Gardner, R. and Walter, J., (1995). Rules, games, and common-pool resources. *The Economic Journal* [online]. No. 105(431), P. 1034. Available from: doi: 10.2307/2235179 (date of access: 24.11.2025).
 14. Ostrom, E., (2014). Collective action and the evolution of social norms. *Journal of Natural Resources Policy Research* [online]. No. 6(4), P. 235–252. Available from: doi: 10.1080/19390459.2014.935173 (date of access: 24.11.2025).
 15. Ostrom, E., (2010). Beyond markets and states: polycentric governance of complex economic systems. *American Economic Review* [online]. No. 100(3), P. 641–672. Available from: doi: 10.1257/aer.100.3.641 (date of access: 24.11.2025).
 16. Dietz, T., (2003). The struggle to govern the commons. *Science* [online]. No. 302(5652), P. 1907–1912. Available from: doi: 10.1126/science.1091015 (date of access: 24.11.2025).
 17. Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A. N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C. L., Schneider, S. H. and Taylor, W. W., (2007). Complexity of coupled human and natural systems. *Science* [online]. No. 317(5844), P. 1513–1516. Available from: doi: 10.1126/science.1144004 (date of access: 24.11.2025).
 18. Ostrom, E., (1999). Revisiting the commons: local lessons, global challenges. *Science* [online]. No. 284(5412), P. 278–282. Available from: doi: 10.1126/science.284.5412.278 (date of access: 24.11.2025).
 19. Field, B. C. and Ostrom, E., (1992). Governing the commons: the evolution of institutions for collective action. *Land Economics* [online]. No. 68(3), P. 354. Available from: doi: 10.2307/3146384 (date of access: 24.11.2025).
 20. Lozinska, A. and Lobach, O., (2025). Development of the information system for solving the problem of renting and buying housing in the netherlands with the introduction of a contextual search algorithm: personalized and accelerated selection of real estate. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management* [online]. No. 2(9), P. 62–68. Available from: doi: 10.20998/2413-3000.2024.9.9 (date of access: 24.11.2025).
 21. Kondratov, O., Severyn, V., Popazov, D., Liubarskyi, S. and Nikulina, O., (2025). Analysis of computational intelligence methods for modeling, identification, optimization of systems and decision support. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management* [online]. No. 2(9), P. 35–44. Available from: doi: 10.20998/2413-3000.2024.9.5 (date of access: 24.11.2025).
 22. Danchenko, O. and Semko, A., (2023). Development of an anti-risk method of optimizing business processes. *Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management* [online]. No. 1(7), P. 27–34. Available from: doi: 10.20998/2413-3000.2023.7.4 (date of access: 24.11.2025).
 23. Grinchenko, M., Ponomaryov, O., Lobach, O. and Kharchenko, A., (2022). Conflicts in project management. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management* [online]. No. 1(5), P. 50–55. Available from: doi: 10.20998/2413-3000.2022.5.6 (date of access: 24.11.2025).
 24. Dagal, I., Ibrahim, A.-W., Harrison, A., Mbasso, W. F., Hourani, A. O. and Zaitsev, I., (2025). Hierarchical multi step Gray Wolf optimization algorithm for energy systems optimization. *Scientific Reports* [online]. No. 15(1). Available from: doi: 10.1038/s41598-025-92983-w (date of access: 24.11.2025).
 25. Wang, L., Zhang, Q., Yang, S. and Dong, Y., (2024). Multi-Strategy grey wolf optimization algorithm for global optimization and engineering applications. *Journal of Systems Science and Systems Engineering* [online]. DOI: 024-5622-zs1151810.1007 (date of access: 24.11.2025).
 26. Ma, S., Fang, Y., Zhao, X. and Liu, Z., (2022). Multi-swarm improved Grey Wolf Optimizer with double adaptive weights and dimension learning for global optimization problems. *Mathematics and Computers in Simulation* [online]. DOI: j.matcom.2022.10.007 (date of access: 24.11.2025).
 27. Tang, C., Huang, C., Chen, Y., Heidari, A. A., Wang, S., Chen, H. and Zhang, Y., (2024). Multi-strategy grey wolf optimizer for engineering problems and sewage treatment prediction. *Advanced Intelligent Systems* [online]. DOI: aisy.202300406 (date of access: 24.11.2025).
 28. Li, Z., Zuo, J., Lv, R., Liu, Z. and Wang, Y., (2021). A hybrid multi-group co-evolution intelligent optimization algorithm: PSO-GWO. *2021 IEEE international conference on electrical engineering and mechatronics technology (ICEEMT)*, 2–4 Jul. 2021, Qingdao, China [online]. IEEE. DOI: iceemt52412.2021.9601716 (date of access: 24.11.2025).
 29. Zhang, Z., Xu, T., Zou, K., Tan, S. and Sun, Z., (2024). Multi-Objective grey wolf optimizer based on improved head wolf selection strategy. *U: 2024 43rd Chinese control conference (CCC)*, 28–31 Jul. 2024, Kunming, China [online]. IEEE. P. 1922–1927. DOI: ccc63176.2024.10662658 (date of access: 24.11.2025).
 30. Zhang, Y., Xu, W., Ye, H. and Shi, Z., (2025). A two-stage optimization framework for UAV fleet sizing and task allocation in emergency logistics using the GWO and CBBA. *Drones* [online]. No. 9(7), P. 501. DOI: 10.3390/drones9070501 (date of access: 24.11.2025).
 31. Dao, S. D., (2020). Particle swarm optimization (PSO) for constrained optimization problems [online]. *Learn With Panda*. URL: <https://learnwithpanda.com/2020/05/19/particle-swarm-optimization-pso-for-constrained-optimization-problems/> (date of access: 24.11.2025).
 32. Glynatsi, N. E., Knight, V. and Harper, M., (2024). Properties of winning iterated prisoner's dilemma strategies. *PLOS computational biology* [online]. V. 20(12), No. e1012644. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1012644 (date of access: 24.11.2025).
 33. Szilagy, M. N., (2024). An investigation of n-person prisoners' dilemmas. *Complex Systems* [online]. No. 14(2), P. 155–174. DOI: 10.25088/complexsystems.14.2.155 (date of access: 24.11.2025).

Надійшла (received) 28.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Скрипка Богдан Юрійович (Skrypka Bohdan) – аспірант кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; email: bohdan.skrypka@cs.khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1964-5332>.

Єльчанінов Дмитро Борисович (Yelchaninov Dmytro) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; email: dmytro.yelchaninov@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5163-9117>.