

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ СПРОМОЖНИХ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД АЛГОРИТМАМИ КОЛЕКТИВНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Литвин В. В., Угрин Д. І., Надєїн Н. Я., Клічук О. Р.

1. Вступ

Останнім часом в Україні спостерігається тенденція до децентралізації влади і об'єднання декількох населених пунктів, формуючи таким чином спроможну територіальну громаду (ТГ). Йдеться про її здатність самостійно забезпечувати належний рівень різноманітних послуг, враховуючи інфраструктуру, ресурси і географічне розташування.

Парламентом 5 лютого 2015 року було схвалено Закон України «Про добровільне об'єднання територіальних громад» [1], а Урядом, для забезпечення його реалізації, затверджено Методику формування спроможних територіальних (постанова Кабінету Міністрів України № 214 від 08.04.2015) [2]. Саме ці акти визначають, яким чином має відбуватись об'єднання громад для того, щоб вони стали спроможними.

Здійснюючи розподіл ресурсів між громадами і схвалюючи перспективний план формування спроможної територіальної громади, робочим групам слід керуватись затвердженою методикою формування спроможних ТГ. Таким чином, враховуючи фінансове забезпечення, громада зможе самостійно або через відповідні органи місцевого самоврядування забезпечувати належний рівень надання послуг, зокрема, у сфері освіти, культури, охорони здоров'я, соціального захисту, житлово-комунального господарства [2].

Однак в реальній практиці досить важко сформувати спроможну громаду через наявність багатьох ключових факторів формування громади:

- неможливість забезпечення на належному рівні надання вторинної медичної допомоги та спеціалізованої освіти;
- потреба в приміщеннях для розміщення установ;
- складне географічне положення, яке має враховувати щоденні міграції мешканців в межах зони доступності адміністративного центру.

Тому на сьогоднішній день основними проблемами реформи є:

- правильний розподіл ресурсів для мінімізації фінансування з боку держави;
- організація перспективних планів об'єднання у всіх районах України з визначенням потенційного центру громади із врахуванням доступності послуг у відповідних сферах на території спроможної ТГ та з умовою наявності середньої школи і амбулаторії в зоні доступності.

Порушення методики формування може призвести до непередбачуваного обороту фінансів у громаді, а також до виникнення «білих плям» – це випадки, коли зона доступності до потенційних центрів не покриває всю територію області. Відстань від центру громади до її найвіддаленішого населеного пункту має бути такою, щоб у екстрених випадках її не довше ніж за 30 хвилин могли подолати пожежна команда, швидка допомога, поліцейський патруль. Допомога, що буде

надана через більший проміжок часу різко втрачає ефективність [2]. Все це зумовлює актуальність теми дослідження.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є методика формування спроможних громад. Одним з найбільш проблемних місць цієї методики є наявність багатьох ключових факторів формування громади:

- неможливість забезпечення на належному рівні надання вторинної медичної допомоги та спеціалізованої освіти;
- потреба в приміщеннях для розміщення установ;
- складне географічне положення, яке має враховувати щоденні міграції мешканців в межах зони доступності адміністративного центру.

Причиною цього є відсутність чітко виражених кроків вдалого формування громади враховуючи специфіку району проектування. Порухення методики формування може призвести до непередбачуваного обороту фінансів в громаді, а також до виникнення «білих плям» – це коли зона доступності до потенційних центрів не покриває всю територію області.

Для виявлення особливостей формування громад проводився технологічний аудит, який має на меті визначення наступних параметрів процесу:

- проведення аналізу окремих районів, НП яких, можна об'єднати в громади;
- визначення особливостей методики формування спроможних громад;
- створення математичної моделі на основі досліджуваної методики;
- здійснення проектування алгоритмів і програмної реалізації адаптованих алгоритмів колонії мурах та зграї птахів для вирішення задачі;
- аналіз і дослідження отриманих результатів.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розробка системи, за допомогою якої можна було б імітувати формування спроможних територіальних громад. В якості алгоритмів для досягнення мети роботи слід використати алгоритми колективного інтелекту.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Проаналізувати методики формування громад для подальшої алгоритмізації.
2. Зробити алгоритмізацію математичної моделі і програмну реалізацію методів оптимізації на основі адаптованих алгоритмів: мурашиного (Ant Colony Optimization – ACO) та оптимізації зграєю птахів (Migrating Bird Optimization – MBO).
3. Розробити систему у вигляді веб-сайту для візуалізації результатів роботи алгоритмів та інтерактивного відображення мапи, як основного інструменту для моделювання.
4. Реалізувати систему динамічно змінюваних критеріїв моделювання.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Моделювання спроможних ТГ являє собою складний процес. Для вибору оптимальних рішень з використанням методики моделювання громад слід розв'язати оптимізаційну багатокритеріальну задачу [3].

Методи локальної оптимізації застосовуються для розв'язання складних у обчисленні оптимізаційних задач. Методи локальної оптимізації, або як їх ще називають

методи локального пошуку, можуть використовуватись для задач, що формулюються як знаходження розв'язку, максимального за певним критерієм, серед існуючих можливих рішень. Ідея методів локальної оптимізації полягає у перебиранні можливих розв'язків шляхом виконання локальних змін, доки результат не зведеться до оптимального або не буде вичерпано певний ліміт часу чи кількість спроб [4].

Оптимізаційна модель утворення ТГ матиме велику кількість умов, що потребуватиме розробки математичної моделі з певною кількістю обмежень. Вдосконалення класичних алгоритмів розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації (ЗБО) з великим обсягом вхідних даних не призведе до отримання найоптимальніших розв'язків, коли мова йде про розв'язання динамічної задачі. Комп'ютерні системи, що базуються на використанні класичних методів, незалежно від початкових даних та принципу знаходження мають наступні недоліки:

- пошук розв'язку виконується одним агентом, що робить неможливим розподілене обчислення, таким чином розв'язуючи лише статичну задачу;
- слабка або неефективна здатність до розпаралелення виконання алгоритму для більшості класичних методів;
- спроможність більшості методів знайти розв'язки, що наближені до оптимального за допустимий час лише для невеликої кількості вузлів.

Розглянуті недоліки комп'ютерних систем роблять їх застосування на практиці неефективними для розв'язання задач великої розмірності.

Існує цілий клас оптимізаційних методів. Умовно всі оптимізаційні методи можна розділити на методи, що використовують поняття похідної, градієнтні методи і стохастичні методи (наприклад, методи групи Монте-Карло) [4, 5].

Досить перспективним виявилось застосування поведінки «природних агентів» – соціальних тварин, здатних щоденно вирішувати складні задачі, які, по суті, близькі до задач з комбінаторної оптимізації, в тому числі і ЗБО. Такі методи отримали назву «методи соціальної поведінки», дані методи відносяться до методів ройового інтелекту (англ. *swarm intelligence*) [6], або як їх прийнято називати інтелектуальними методами оптимізації. Ройовий інтелект є результатом колективної поведінки агентів децентралізованої (від терміну «рій») залишається лише поняття сім'ї, колективу, без врахування центру такого колективу) самоорганізуючої (здатної самостійно розв'язувати поставлені завдання) системи. Більшість задач комбінаторної оптимізації успішно вирішуються в природі колонією мурах та зграєю птахів. Єдиний центр відсутній, тобто комахи діють незалежно, самоорганізовано, узгоджено з колективом. Алгоритми цих самоорганізованих істот перспективно дослідити та реалізувати на практиці. Останніми роками інтенсивно розробляється науковий напрямок з назвою «Природні обчислення» (*Natural Computing*), який об'єднує математичні методи, в основі яких принципи природних механізмів прийняття рішень [7].

Таким чином усі дії комах зводяться до елементарних інстинктивних реакцій на навколишнє оточення та інших комах. Отже, досягається механізм стігмергії – непряма взаємодія між агентами на основі міток. Таким чином колектив комах здатен ефективно знаходити найоптимальніший маршрут [8].

Завдяки процедурі «випаровування феромону» можна уникати ідентичних рішень задачі при багатьох ітераціях. Крім того, у процесі оптимізації відбувається

нанесення феромону на пройдені ребра відповідно до довжини маршруту для збереження накопиченого досвіду про оптимальні рішення [9–12].

5. Методи дослідження

Робота алгоритму АСО починається з розміщення мурашок у вершинах графа, потім починається рух мурашок – напрям визначається імовірнісним методом, на підставі формули:

$$P_i = \frac{l_i^\alpha \cdot f_i^\beta}{\sum_{k=0}^N l_k^\alpha \cdot f_k^\beta}, \quad (1)$$

де P_i – вірогідність переходу дорогою i ; l_i – довжина i -ого переходу; f_i – кількість феромонів на i -ому переході; α – величина, яка визначає «жадібність» алгоритму; β – величина, яка визначає «стадність» алгоритму і $\alpha + \beta = 1$.

Основна ідея методу МВО полягає в переміщенні часток у просторі можливих рішень. Нехай вирішується завдання знаходження мінімуму (максимуму) функції виду $f(X)$, де X – вектор змінних параметрів, які можуть приймати значення з деякої області D . Тоді кожна частка в кожен момент часу характеризується значенням параметрів X з області D (координатами точки в просторі рішень) і значенням функції $f(X)$, яку потрібно оптимізувати. При цьому частка «запам'ятовує» найкращу точку в просторі рішень, в якій була, і прагне до неї повернутися. Як зв'язок між частинками, використовується так звана спільна пам'ять, (кожна частка знає координати найкращої точки серед усіх, в яких була будь-яка частка рою). Крім того на рух частинки впливають інерційність і випадкові відхилення.

Класичний алгоритм використовує тільки 3 коефіцієнти: C_1 , C_2 і ω . При цьому використовуються наступні формули:

$$V_{ij+1} = V_{ij}\omega + C_1(P_{ij} - X_{ij})r_1 + C_2(G - X_{ij})r_2, \quad (2)$$

$$X_{ij+1} = X_{ij} + V_{ij+1}, \quad (3)$$

де V_{ij} – швидкість i -ої частинки на j -ій ітерації алгоритму;

P_{ij} – координати найкращої точки в просторі рішень, у якій була i -та частка від 1 до j -ої ітерації алгоритму;

X_{ij} – координати позиції i -ої частинки на j -ій ітерації;

G – координати найкращої точки, що знайдена роєм на момент j -ої ітерації;

r_1 і r_2 – випадкові числа, що рівномірно розподілені в інтервалі $[0, 1)$;

C_1 і C_2 – визначають значимість для агента свого кращого положення і кращої позиції серед всього рою;

ω – характеризує інерційні властивості часток.

Координати найкращої точки – це найкраща позиція, знайдена зграєю і характеризує колективну пам'ять зграї [6–8].

Таким чином, зміна швидкості кожної частки (її прискорення) визначається, як сума двох векторів, перший направлений на власну найкращу позицію, а другий на найкращу позицію, знайдену всім роєм.

Експерименти показали, що коефіцієнти C_1 і C_2 можуть вибиратись по-різному. Найкращою вважається ймовірнісна схема, або всі коефіцієнти вибираються випадковим чином з діапазону $[0,1]$, або C_1 вибирається випадковим чином, а значення C_2 тоді буде рівним $1-C_1$ [4, 6].

6. Результати дослідження

6.1. Побудова математичної моделі формування спроможних територіальних громад

З метою ефективного формування спроможних ТГ доцільно дослідити моделі стохастичних алгоритмів. Для цього необхідно розробити математичну модель такої задачі й адаптувати її для розв'язання алгоритмами АСО та МВО. Математична модель представляється у вигляді багатокритеріальної задачі. Маючи таку модель і розробивши методи її розв'язування можна обґрунтувати формування ТГ. Весь район, у якому ведеться моделювання, можна зобразити у вигляді графа, де складовою територіальних громад (ТГ) є населені пункти (НП). НП зв'язані між собою дорогами із твердим покриттям, довжина d яких відома. Тобто отримується зважений граф, вершинами якого є НП, а ребрами дороги між НП. НП (вершини графа) характеризуються параметрами, які потрібні для формування громади:

- тип (село, селище міського типу, селище, місто);
- кількість шкіл, кількість лікарень тощо;
- якість доріг, які ведуть до НП;
- відстань до найближчого центру;
- наявність ради.

Дуги задають дороги з твердим покриттям, деякі дуги графа можуть бути орієнтованими, тобто НП, в якій відсутня сільська рада може відноситися до НП, в яких наявна сільська рада. Кількість рад у регіоні, що моделюється можна позначимо k . Можна сказати, що кожна ТГ складається із множини рад, крім того, кожна рада R_i складається з множини НП, тобто:

$$TG_i = \{R_1, R_2, \dots, R_{k_i}\}, \quad (4)$$

$$R_i = \{NP_1, NP_2, \dots, NP_{m_i}\}, \quad (5)$$

де TG_i – територіальна громада; R_i – рада; NP_m – населений пункт.

Для пропонованої моделі, згідно з методикою моделювання, важливими є такі дані: наявність закладів, які утримуються за рахунок бюджету органів місцевого самоврядування:

- кількість загальноосвітніх шкіл III ступеня (S);
- кількість лікарень (L);
- кількість дитячих садочків (D);
- закладів культури (K);
- закладів фізичної культури (F);

- фельдшерсько-акушерських пунктів (A);
- амбулаторій, поліклінік (P);
- станцій швидкої допомоги (SH).

Необхідна також наявність приміщень для розміщення державних органів та установ, що здійснюють повноваження: правоохоронної діяльності (V); пенсійного забезпечення (Z); соціального захисту (H); пожежної безпеки (B); казначейського обслуговування (O).

В методиці вказано, що для успішного формування ТГ, в ній має бути розвинута інфраструктура, зокрема на території обов'язково має бути загальноосвітній навчальний заклад I–III ступеня, лікарня, дитячий садочок, заклад правоохоронної діяльності та пожежна станція. Ці критерії визначають спроможність громади. Найвіддаленіший населений пункт громади має бути легко досяжним для пожежної команди, швидкої допомоги чи поліцейського патруля.

Враховуючи ухвалену методику формування [2], можна розглянути обмеження на формування спроможної ТГ:

На території спроможної громади повинні бути принаймні 1 загальноосвітня школа III ступеня, 1 лікарня, 1 дитячий садочок, 1 заклад правоохоронної діяльності та мінімум 1 пожежна станція. Запишемо це обмеження наступним чином:

$$(\forall TG_i): (S_i^{TG} > 0), (L_i^{TG} > 0), (D_i^{TG} > 0), (V_i^{TG} > 0), (B_i^{TG} > 0), \quad (6)$$

де TG_i – громада i ; S_i^{TG} – кількість шкіл в i -ій громаді;

L_i^{TG} – кількість лікарень;

D_i^{TG} – кількість дитячих садочків;

V_i^{TG} – кількість закладів правоохоронної діяльності;

B_i^{TG} – кількість пожежних станцій.

1. Раду називають незалежною, якщо в ній кількість лікарень, пожежних станцій, шкіл, садочків, правоохоронних закладів більше 0. Множину незалежних рад позначимо \tilde{R} . Запишемо це обмеження так:

$$(S_i > 0), (L_i > 0), (D_i > 0), (V_i > 0), (B_i > 0) \rightarrow (R_i \in \tilde{R}). \quad (7)$$

Якщо рада не є незалежною, то її називають залежною (множину залежних рад позначатимемо \bar{R}). Незалежна рада сама по собі може утворювати ТГ, а залежна ні. Підмножина залежних рад утворює незалежну раду, при умові (6).

Суміжність рад є одним із критеріїв. Під суміжністю рад розуміють наявність суміжних вершин у графі, де вершини – це НП, які відносяться до різних рад. Запишемо функцію суміжності рад таким чином:

$$g(R_i, R_j) = \begin{cases} 1, & \text{якщо ради } R_i \text{ та } R_j \text{ суміжні,} \\ 0, & \text{якщо ради } R_i \text{ та } R_j \text{ несуміжні.} \end{cases}$$

Таким чином, якщо ТГ складається більше, ніж з однієї ради, то для будь-якої ради, що входить у цю ж ТГ має існувати суміжна йому рада з цієї ТГ. Запишемо це наступним чином:

$$(\forall R_i \in TG_m)(\exists R_j \in TG_m): (f(R_i, R_j) = 1). \quad (8)$$

2. Крім того за алгоритмом Флойда-Уоршалла, на основі зваженого графу відстаней між НП, будується матриця найкоротших відстаней d_{ij} між НП в межах регіону. Адміністративним центром ТГ є НП, відстань від якого до всіх інших НП в межах ТГ є мінімальною і становить ≤ 25 км. Запишемо це наступним чином:

$$d_k = \sum_{j=1}^{n_i} d(x_j, x_k), d(x_j, x_k) \leq 25, k = 1, 2, \dots, n_i, \quad (9)$$

де d_k – сумарна відстань;

x_j – початковий НП;

x_k – пункт призначення;

k – кількість НП в ТГ.

НП, які відповідають умові (9), формують множину N_p (НП, які можуть бути центрами громади). Якщо множина $N_p = \emptyset$, то ТГ з розглянутих НП сформувати неможливо. Тому із ТГ необхідно виключити деякий НП і перезапустити алгоритм. Будемо вважати, що множина N_p не порожня. Тоді із цієї множини потенційним центром ТГ буде НП, для якого наступна умова досягає мінімуму:

$$P_i^{TG} = \arg \min_{N_j \in N_p} d_j. \quad (10)$$

Такому центру ТГ відповідає сумарна відстань до всіх інших НП в межах однієї ТГ d_i^{TG} . На цьому кроці вибирається населений пункт, сумарна відстань від якого до пропонуванних для входження пунктів є найменшою;

Наступним кроком є дослідження можливості призначення потенційного НП центром громади за допомогою обмеження (6). Тому критерієм формування k громад в певному регіоні є мінімізація функції:

$$f(x) = \sum_{i=1}^k d_i^{TG} \rightarrow \min. \quad (11)$$

Математична модель задачі полягає у формуванні в заданому регіоні спроможних територіальних громад, мінімізувавши функцію (11) при обмеженнях

(6)–(10). Рішення отриманої ЗБО полягає у виборі оптимального рішення з допустимої множини рішень. Точка $x = (x_1, \dots, x_n)$, яка задовольняє обмеженням, називається допустимим рішенням оптимізаційної задачі. Множина усіх допустимих рішень ЗБО називається допустимою множиною заданої задачі, яку і треба знайти.

Під час опису математичної моделі не враховано інші важливі чинники, які впливають на визначення спроможності громади: чисельність населення (у тому числі шкільного, дошкільного віку), обсяг доходів та загальна площа ТГ, що формується.

Вище наведені критерії мають високий фактор динамічності, вони постійно змінюються, тому їх використання може значно впливати на якість прийняття рішення на основі статичних критеріїв. Сфера освіти, культури, охорони здоров'я, соціального захисту, житлово-комунального господарства та розвинена інфраструктура відносяться до статичних критеріїв. Тому вони мають вирішальне значення у процесі формування перспективного плану об'єднання.

Постановка задачі дуже схожа на постановку задачі про розбиття графу (Graph partition). Ця задача відноситься, до так званого класу NP-повних задач.

Для візуалізації процесу формування спроможних ТГ розроблено модель, що охоплює усі етапи процесу та враховує вимоги, які визначені методикою формування спроможних ТГ. Відповідно до затвердженої методики, процес формування складається з наступних кроків (діаграму діяльності процесу подано на рис. 1):

- ініціювання створення робочих груп. На цьому етапі голова ради – ініціатор готує розпорядження «Про ініціювання добровільного об'єднання територіальних громад», облдержадміністрація створює робочу групу, яка розробляє перспективний план. До складу робочої групи входять: представники ОДА, органи місцевого самоврядування, органи самоорганізації населення та громадськості;
- визначення меж району, де буде проводитись моделювання, населених пунктів, або переліку територіальних громад, що можуть увійти до складу спроможної територіальної громади та визначення потенційних центрів об'єднаних громад;
- ініціювання створення робочих груп. На цьому етапі голова ради – ініціатор готує розпорядження «Про ініціювання добровільного об'єднання територіальних громад», облдержадміністрація створює робочу групу, яка розробляє перспективний план. До складу робочої групи входять: представники ОДА, органи місцевого самоврядування, органи самоорганізації населення та громадськості;
- визначення меж району, де буде проводитись моделювання, населених пунктів, або переліку територіальних громад, що можуть увійти до складу спроможної територіальної громади та визначення потенційних центрів об'єднаних громад;
- визначення основних повноважень органів місцевого самоврядування територіальних громад для забезпечення її розвитку (критеріїв спроможності);
- визначення зон доступності потенційного адміністративного центру спроможної територіальної громади, що є оптимальним для того, щоб надавати адміністративні та інші послуги мешканцям громади та формування множини ТГ з умовою того, що НП увійдуть до складу об'єднаної громади та, чи може залишатися центром потенційний визначений центр;

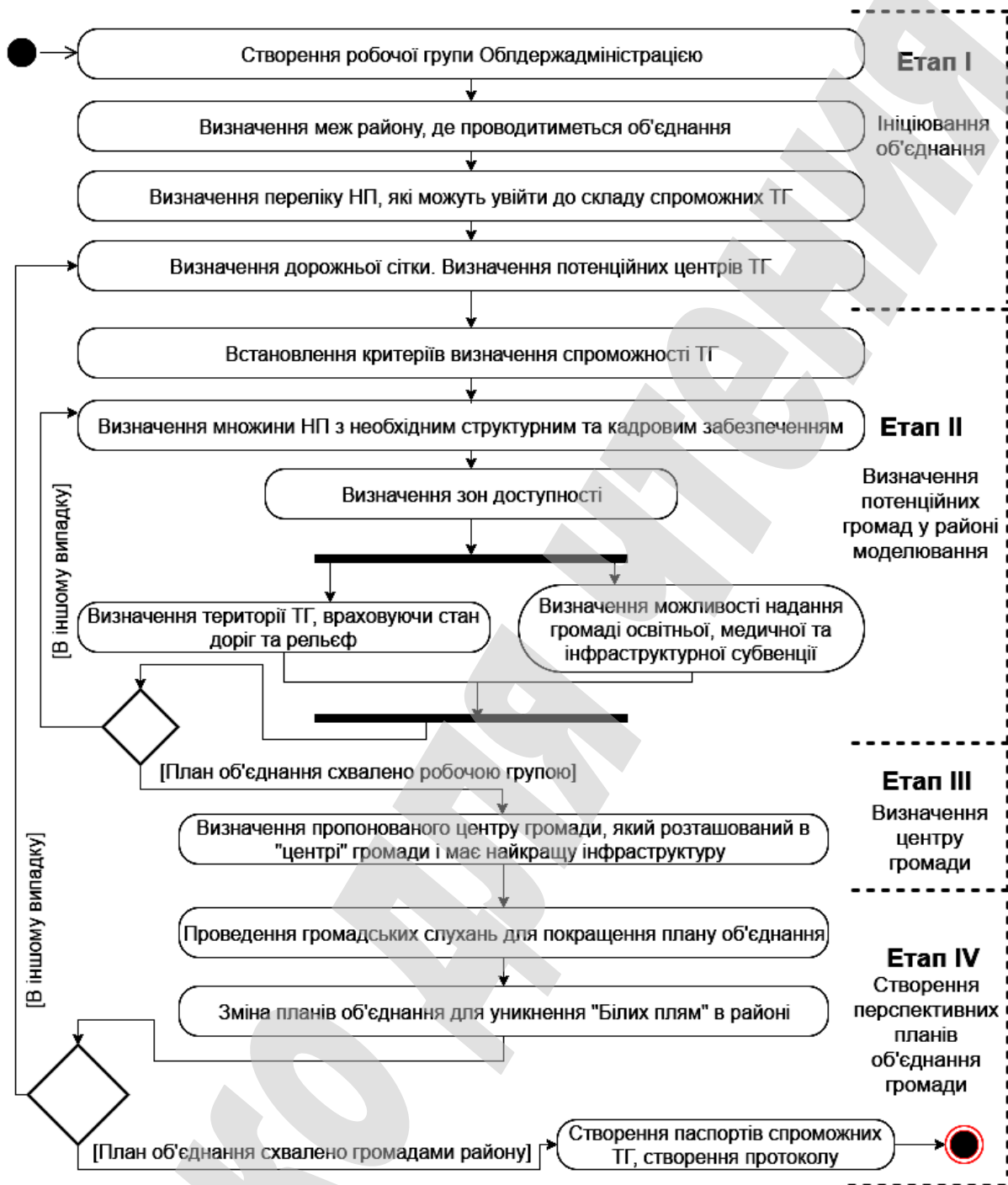


Рис. 1. Діаграма діяльності процесу формування спроможних територіальних громад (ТГ)

– визначення інфраструктурної спроможності потенційної об'єднаної громади. Наявність середньої школи та лікарні є обов'язковою та визначення центрів та меж ТГ. Визначення переліку територіальних громад, території яких не охоплюються зонами доступності потенційних адміністративних центрів;

– для того, щоб були враховані інтереси самих громад, під час розроблення плану проводяться консультації з органами самоврядування та громадські слухання;

– створення перспективних планів, які складаються з:

✓ графічної частини, яка відображає межі спроможних ТГ, потенційні адміністративні центри таких громад та всі населені пункти;

✓ паспорту спроможної територіальної громади з описом кожної такої громади;

- ✓ протоколу консультації з представниками громад.

6.2. Застосування алгоритму мурашиних колоній для формування спроможних територіальних громад

Метод колонії мурах здатен розв'язувати ЗБО, беручи за початкові дані тільки початковий вузол $P(0)$. Матриця вартостей (феромонів) C та матриця доступностей (відстаней) D в повному обсязі є необов'язковими для даного методу, тобто дані можуть бути частково невідомими на початок обчислень або евристичними [9].

Алгоритм колонії мурах базується на застосуванні декількох агентів і має специфічні властивості, характерні мурахам, які використовуються для орієнтації у фізичному просторі, зокрема феромон, яким мурахи помічають пройдений шлях. Мітки у випадку апаратно-програмної реалізації алгоритму є цифровими (хімічними у справжніх мурах). Значення мітки, що відноситься до з'єднання $НП_i$ до $НП_j$ позначимо як M_{ij} , а сукупність значень міток складає матрицю M (marks). Дану сукупність значень міток ще називають пам'ять колонії мурах, яка є акумулятором накопиченого мурахами досвіду в процесі розв'язання ЗБО. Для розв'язку поставленої задачі мурашиним алгоритмом ключовими є наступні вхідні параметри:

- кількість агентів (мурах) – позначимо як k ;
- доцільність використання допоміжних засобів підсилення знайдених квазі-оптимальних маршрутів шляхом збільшення значення мітки (додаткового «нанесення феромону») з метою пришвидшення розв'язання ЗБО;
- параметри процесів «накладання феромонів» та «випаровування феромонів»;
- критерій зупинки обчислень: кількість ітерацій циклу пошуку маршрутів мурахами або час обчислення;
- коефіцієнти, що визначають співвідношення довжини ребер – β та значення феромону (значень міток) – α .

Оскільки мурахи вирішують проблеми пошуку оптимальних шляхів за допомогою хімічної регуляції (феромонів), то інший мураха, відчувши слід на землі, відправляється по ньому, завдяки механізму стігмергії – непрямій взаємодії між агентами на основі міток.

Розв'язуючи поставлену задачу, докільціям для руху мурах є орієнтований граф, вершинами якого є НП, серед яких слід сформувати спроможні громади. Кожне ребро має вагу, яка позначається як відстань між двома НП, сполученими ним. Граф двонаправлений, тому мураха може подорожувати по грані у будь-якому напрямі. Перед початком алгоритму усі агенти розміщуються у вершинах графа.

На початку роботи алгоритму задаються початкові значення усіх міток M_{ij} , що розташовані на з'єднаннях між НП, які в сукупності утворюють матрицю M . Початкове значення для ініціалізації є невеликим додатним числом, тобто на початковому кроці ймовірності переходу до наступного вузла будуть рівні та не нульові. Фактично пам'ять колонії мурах на початку є обнуленою (без досвіду колонії).

Для пропонованої задачі формування спроможних громад слід заповнити матрицю феромонів M (ребер графа) враховуючи ймовірність переходу з i -того НП в j -тий за рахунок наявності в j -тому НП необхідних для створення громади адміністративних об'єктів (шкіл, садочків, пожежних станцій тощо). Кожна адміністративна будівля має свій пріоритет, який задається динамічно і може

змінюватись під час роботи алгоритму. На основі пріоритету кожної адміністративної будівлі у j -тому НП і кількості критеріїв, які впливають на визначення спроможності, вираховується початкове значення мітки з діапазону $[0,1]$ за наступним рівнянням:

$$M_{ij} = \sum_{c=0}^q 1 * \frac{PR_c}{CR}, \quad (12)$$

де M_{ij} – інтенсивність феромону на ребрі з i в j ; CR – кількість критеріїв, для яких проводиться моделювання; q – кількість критеріїв в НП з індексом j ; PR – пріоритет критеріїв з індексом c для НП з індексом j .

Крім того, імовірність включення ребра у маршрут окремої мурахи пропорційна кількості феромону на цьому ребрі, а кількість феромону, що відкладається, пропорційна довжині маршруту. Чим коротше маршрут тим більше феромону буде відкладено на його ребрах, отже, більша кількість мурах включатиме його складові в синтез власних маршрутів.

Під час роботи алгоритму мураха підтримує список НП, які вже відвідав. Таким чином, мураха-агент повинен проходити через НП, які знаходяться в межах доступності до центру громади [9, 12].

Рух мурахи-агента базується на одному досить простому імовірнісному рівнянні (1). Якщо мураха-агент ще не закінчив шлях, тобто відвідав не достатню кількість НП для формування спроможної ТГ, то для визначення наступного НП для переходу використовується імовірнісна вибірка на основі значення функції зворотного відображення значущості пройдених НП.

Вузли, які мураха-агент відвідав, заносяться до списку заборонених для відвідування, який ще називають списком табу (taboo list). Оскільки агент подорожує тільки по НП, які ще не були відвідані (відповідно до списку табу), імовірність розраховується тільки для з'єднань, які ведуть до ще не відвіданих, доступних НП. Процедура знаходження наступного вузла відбувається доки не буде пройдено усі НП серед яких можливо сформувати спроможну громаду [12, 13].

Після того, як всі мурахи-агенти завершили свій шлях для кожного агента досліджується його пройдений шлях і чи всі населені пункти знаходяться в межах 25 км згідно з обмеженням (9). Наступним кроком є вибір центру пропонованої громади, визначенням мінімальної відстані від усіх пропонованих НП за допомогою (11).

Наступним кроком є збільшення мурахами кількості феромону на ребрах між НП. Після завершення маршруту, вартість шляху може бути підрахована. Вона дорівнює сумі довжин усіх з'єднань, по яких проходили мурахи-агенти. Зміна значень кількості феромону на $\Delta M_{ij}^k(t)$, яка відбувається на кожному з'єднанні, що складає маршрут, для k -ої мурахи-агента обчислюється за наступним рівнянням:

$$\Delta M_{ij}^k(t) = \frac{Q}{C^k(t)}, \quad (13)$$

де Q – константа, що пропорційна очікуваній довжині пройденого шляху; $C^k(t)$ – сумарна довжина пройденого маршруту на момент часу t для k -тої мурахи.

Результатом рівняння (13) є отримання досвіду для пам'яті колонії мурах, причому з'єднання між НП, що складають маршрут з меншою сумарною відстанню, отримують більші значення феромону ніж з'єднання, що є складовими частинами маршрутів, які мають більшу довжину. Отриманий результат $\Delta M_{ij}^k(t)$ використовується в рівнянні (14), щоб збільшити інтенсивність феромону на кожному ребрі між НП пройденого мурахою-агентом маршруту. Збільшення значення мітки (накладання феромону) відбувається в кінці кожної ітерації циклу пошуку маршрутів мурахами-агентами, після процедури «випаровування феромону» (15).

$$M_{ij}(t+1) = M_{ij}(t) + \sum_k \Delta M_{ij}^k(t), \quad (14)$$

$$M_{ij}(t+1) = M_{ij}(t) * (1 - P), \quad (15)$$

де P – константа, що визначає інтенсивність випаровування в межах $[0, 1]$.

Рівняння (14) застосовується до усього маршруту і при цьому значення феромону на кожному ребрі збільшується пропорційно до довжини пройденого маршруту. Тому необхідно дочекатися, доки мураха-агент закінчить подорож і тільки потім оновити значення феромону згідно до отриманого агентами досвіду, інакше істинна довжина пройденого шляху залишиться невідомою [9, 14].

Моделювання такого підходу, що використовує тільки позитивний зворотний зв'язок, призводить до передчасної збіжності – більшість мурах рухаються по локально-оптимальному маршруту, що призводить до неоптимальних розв'язків [12, 13].

Уникнути цього можна моделюючи негативний зворотний зв'язок у вигляді випаровування феромону (15). Якщо феромон випаровується швидко, то це призводить до втрати накопиченого досвіду, що зберігається в пам'яті колонії мурах та відомостей про оптимальні рішення. З іншого боку, великий час випаровування може призвести до отримання стійкого локального оптимального рішення без можливості пошуку більш оптимальних рішень.

Знаходячи оптимальні розв'язки ЗБО для формування спроможних громад, алгоритму потрібна деяка визначена кількість ітерацій, яка зазначається на початку моделювання. Протягом кожної ітерації циклу мурахи-агенти, починаючи свій шлях з деякого початкового НП $P(0)$, переміщуються по мережі відвідуючи інші НП, переходячи по з'єднанням між НП, що обираються згідно рівняння (1). Кожна ітерація циклу пошуку маршрутів мурахами-агентами закінчується поверненням усіх агентів до початкового НП та збиранням результатів, після чого для кожного k -ого агента очищується список «табу» та стирається довжина пройденого маршруту разом з записаним результуючим маршрутом. Цикл виконується за однією або декількома з наступних умов: виконано визначену кількість ітерацій; найкращі рішення мають дуже малий коефіцієнт зміни,

порівняно з попередніми рішеннями; вичерпано визначений ліміт часу обчислення ЗБО [14, 15]. Після того, як шлях завершено та мураха-агент повернувся в початковий вузол, проводиться процедура визначення, чи є можливість сформувати громаду на основі отриманих даних. Якщо так, то за допомогою обмежень (6)–(10) визначаються НП та пропонується центр ТГ. Далі здійснюється процедура «випаровування феромону» на усіх ребрах для уникнення ідентичних рішень. Крім того, відбувається нанесення феромону на пройдені ребра відповідно до довжини маршруту для збереження накопиченого досвіду про оптимальні рішення.

Далі здійснюється аналіз усіх сформованих громад мурахами-агентами, та здійснюється вибір найоптимальніших. Після завершення циклу формування найкращих громад, здійснюється аналіз усіх пропонуєваних розв'язків для визначення найкращого. Найкращий розв'язок може змінюватись, якщо запускати алгоритм декілька раз. Крім того, гнучкість параметрів α і β дозволяє контролювати якість пропонуваного розв'язку та жадність алгоритму [15]. При $\alpha=1$ і $\beta=0$ в результатах будуть враховані лише адміністративні будівлі. При $\alpha=0$ і $\beta=1$ результат буде опиратись на відстань між НП.

На рис. 2 представлена блок-схема реалізації алгоритму АСО для формування спроможних громад. Згідно описаного алгоритму вирішення задачі формування ТГ, на початку роботи алгоритму здійснюється ввід коефіцієнтів алгоритму АСО, НП та критерії для моделювання. Наступним кроком є ініціалізація агентів.

В процесі роботи кожний мураха пропонує своє найкраще рішення для кожного НП у районі (графі) моделювання. Вибір пунктів здійснюється за допомогою формули (1).

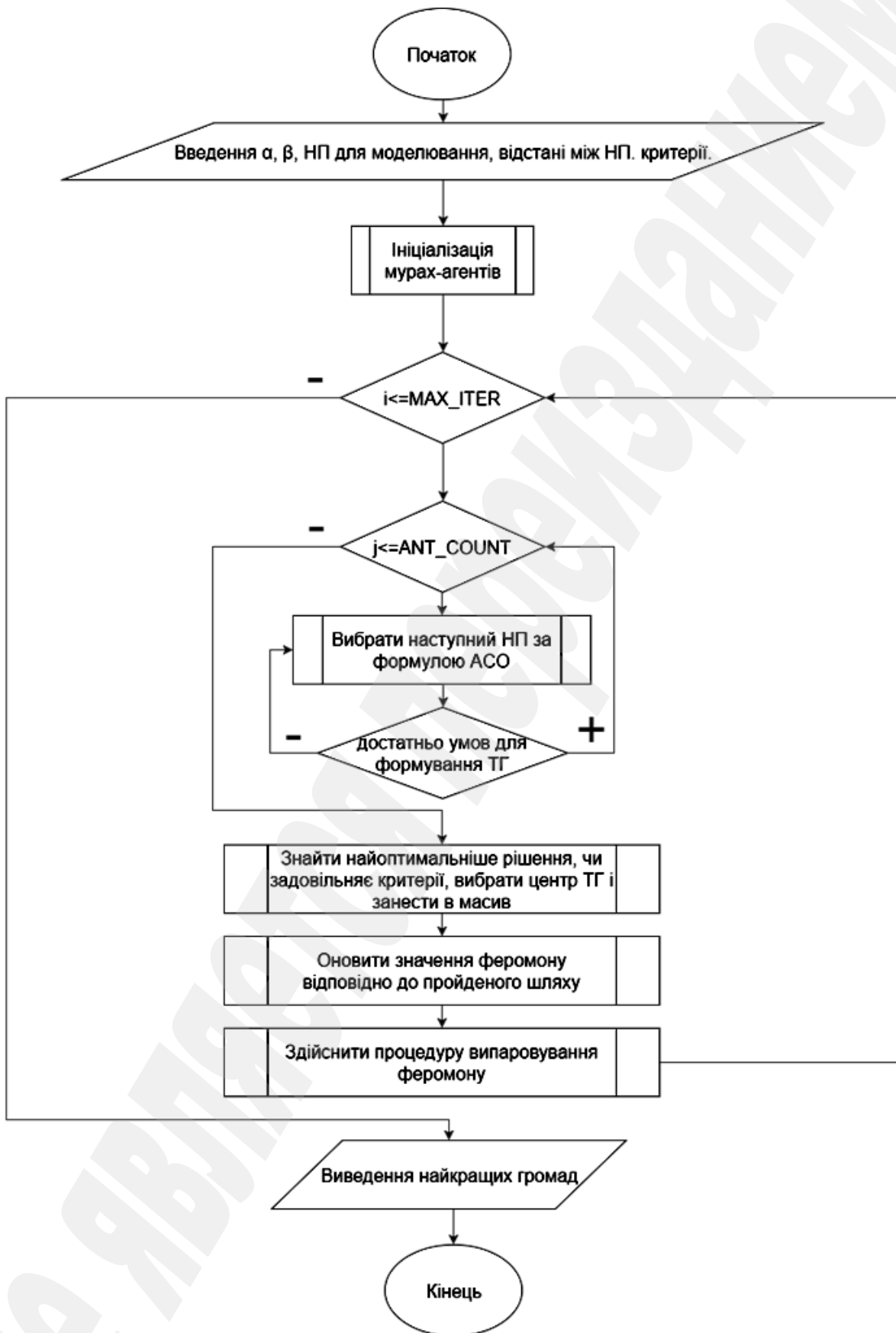


Рис. 2. Блок-схема програмної реалізації ACO (Ant Colony Optimization)

Після завершення роботи дані збираються і здійснюється процедура оновлення значення феромону та його випаровування відповідно до опису вирішення задачі формування ТГ за алгоритмом АСО. В кінці обираються найоптимальніші рішення.

6.3. Застосування алгоритму зграї птахів для формування спроможних територіальних громад

В основі методу МВО лежить те, що окремі члени зграї можуть отримати вигоду від попереднього досвіду всіх інших членів зграї при пошуку оптимальних рішень. Ця перевага алгоритму стає вирішальною завжди, коли необхідні об'єкти розташовані на шляху випадковим або невідомим чином. Тобто існує соціальний поділ інформації серед представників одного виду, який вигідний всім членам зграї. Метод базується на групуванні агентів за рахунок визначеної топології зв'язків в зграї. Використовується для вирішення оптимізаційних завдань в багатокритеріальній постановці. У цьому випадку задачу оптимізації можна сформулювати і вирішити як задачу векторної оптимізації, яка полягає в мінімізації векторного критерію [5, 6].

Задача глобальної оптимізації формулюється як задача мінімізації цільової функції (11) в просторі пошуку D :

$$x \in D = \{x \in R^d\}, \quad (16)$$

де D – область пошуків оптимального рішення; d – кількість вершин у графі; x – аргумент функції, що оптимізується; X^* – глобальне рішення.

Кількість агентів, що застосовується в алгоритмі МВО, безпосередньо впливає на якість проведеної оптимізації. Занадто маленьке їх число може не дозволити локалізувати глобальний оптимум або ж швидкість збіжності до нього буде дуже низька. Збільшення числа використовуваних агентів підвищує імовірність знаходження оптимального рішення, однак може призвести до надмірно високої кількості обчислень цільової функції [8].

Для вирішення ЗБО стосовно формування спроможних громад достатньо вказати розмір рою, який був би рівним кількості НП в заданому районі, для якого виконується оптимізація.

У даному методі зграя птахів є сукупністю точок-рішень, які переміщуються у просторі в пошуках глобального оптимуму. При своєму русі частинки намагаються поліпшити знайдене ними раніше рішення і обмінюються інформацією з своїми сусідами. Позначимо сукупність позицій агентів зграї наступним чином:

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_t\}, \quad (17)$$

де t – кількість птахів у зграї. Позиція i -тої частинки – це сукупність її координат (відвіданих НП) (17) в середовищі пошуку (у графі розмірністю d).

$$(b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{id}), \quad i = \overline{1, t}. \quad (18)$$

На початковому етапі роботи алгоритму проводиться випадкова ініціалізація агентів зі зграї. Якщо відсутня будь-яка визначена інформація про функцію, що оптимізується, то найпростіше початкові положення агентів вибирати за формулою:

$$b_{ij} = rand(b_{j_{\min}}, b_{j_{\max}}), \quad (19)$$

де b_{ij} – j -а координата i -того агента; $rand(b_{j_{\min}}, b_{j_{\max}})$ – випадкове число з рівномірним законом розподілу на інтервалі, який визначає межі пошуку у графі.

Зі зграєю птахів також асоціюється множина векторів швидкостей агентів:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_t\}. \quad (20)$$

На початковому етапі всі швидкості прийнято вважати рівними нулю. Під час руху птахів по області розв'язків перевіряється наявність у кожному з відвіданих НП необхідних для створення громади об'єктів (шкіл, садочків тощо). Крім того, запам'ятовується пройдений шлях і його довжина. Коли агент під час руху обійшов деяку множину НП, серед яких можливо вибрати центр за обмеженням (6) визначається центр громади за обмеженням (9) та (10) для створення оптимального плану об'єднання. Якщо можливо, то за обмеженням (7) кожний агент пропонує свою множину незалежних рад.

Таку послідовність кроків слід зробити для кожного агента у зграї для аналізу запропонованих рішень і їх порівняння. Після того, як усі агенти у зграї запропонували свої рішення, алгоритм намагається знайти найкраще рішення для функції (11) (fitness) для того, щоб можна було сформулювати спроможну громаду [7]. Для цього, серед усіх запропонованих розв'язків слід знайти розв'язок, для якого наступна формула дає найбільше значення:

$$R_i = \sum_{j=1}^c CR_j + \frac{1}{d_i}, \quad (21)$$

де R_i – коефіцієнт оптимальності рішення для i -того агента;

$\sum_{j=1}^c CR_j$ – сумарна кількість критеріїв у відвіданих НП;

d_i – відстань пройдена i -тим агентом

Після цього, дане рішення стає найкращим, поки не буде знайдено кращого співвідношення на наступних ітераціях алгоритму.

Наступним кроком є оновлення швидкості і позиції агента, за формулами (2) та (3). Якщо в процесі оптимізації агент виходить за межі простору пошуку, відбувається обнулення швидкості цього агента, а сам агент повертається до найближчої границі графа. Інерційний коефіцієнт ω визначає вплив попередньої швидкості частки на її нове значення. Чисельні експерименти показують, що при підвищенні розмірності вирішуваної задачі оптимізації

кращих результатів вдається досягти, якщо застосовувати більш вузький інтервал варіювання інерційного коефіцієнту, збільшуючи його нижню межу, щоб уникнути швидкої втрати агентами їх швидкостей.

Може статись передчасна збіжність алгоритму, коли більшість агентів у зграї практично перестають змінювати свої оптимально-локальні рішення, а глобальне рішення все ще залишається не знайденим. Ця ситуація може виникнути при використанні невеликих значень інерційного, когнітивного або соціального коефіцієнтів.

Ще однією особливістю застосування алгоритму є те, що значення коефіцієнтів для рівняння (2) вибирається в наступних діапазонах:

$$\begin{cases} 0 < \omega \leq 1, \\ 0 < C_1, C_2 \leq 1. \end{cases} \quad (22)$$

Для забезпечення збіжності цього методу оптимізації, для підтримки балансу між локальним і глобальним пошуком, чисельні значення коефіцієнтів C_1 і C_2 зазвичай вибираються однаковими. Також можливі різні способи динамічного вибору параметрів зграї, проте така адаптація вимагає додаткових початкових ітерацій алгоритму, що може привести до збільшення кількості обчислень цільової функції, що необхідні для знаходження оптимального розв'язку. Додатковим параметром алгоритму є максимальне допустиме значення модуля параметра швидкості агентів зграї v_{\max} . Зазвичай воно вибирається невеликим, наприклад,

$v_{\max} = \frac{1}{4}$. Якщо значення допустимої швидкості виходить за межі діапазону $[-v_{\max}, v_{\max}]$, то агент повертається до НП.

У процесі роботи алгоритму, зграя володіє пам'яттю про найкращі рішення, що знайдені окремими агентами і всією зграєю в цілому. Під час ініціалізації початкові позиції агентів вважаються найкращими. На кожній наступній ітерації алгоритму після застосування формул (2) та (3) індивідуальні кращі позиції кожного агента b_i і найкраще рішення знайдене роєм G оновлюються за правилами:

$$\begin{cases} b_i = x_i, & \text{якщо } f(x_i) < f(b_i), \\ G = b_i, & \text{якщо } f(b_i) < f(G). \end{cases} \quad (23)$$

Після усіх обчислень, коли фактор зміни оптимальності розв'язку дуже малий, здійснюється аналіз усіх сформованих громад птахами-агентами. Крім того, гнучкість параметрів C_1 і C_2 дозволяє контролювати якість пропонованого розв'язку, чи в якості розв'язків перевага надається загальному розв'язку зграї, або локальному для кожного агента [4, 6–8].

На рис. 3 представлена блок-схема реалізації алгоритму МВО для формування спроможних громад.

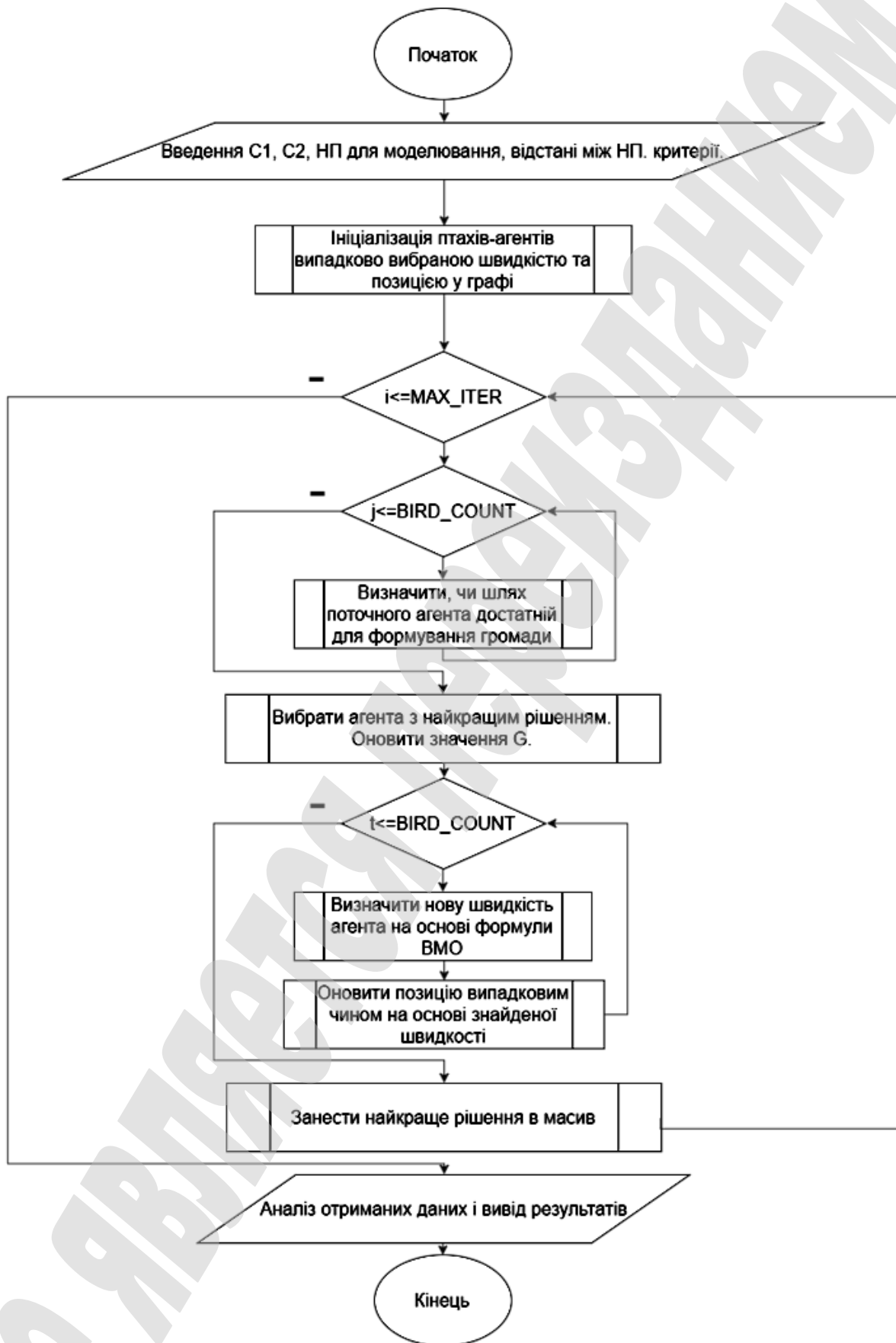


Рис. 3. Блок-схема програмної реалізації MBO (Migrating Bird Optimization)

На початку роботи алгоритму усі агенти-птахи ініціалізуються випадковим вектором швидкості та позицією у графі. Далі визначається, чи серед НП деякого

агента є усі критерії, і можна сформувати громаду. Найкраще значення відношення критеріїв до загального шляху стає найкращим для зграї. На основі формули (1) оновлюється вектор швидкості агентів враховуючи позицію зграї.

6.4. Логічна структура програмної реалізації

У розробленій системі формування спроможних ТГ має бути охоплено усі етапи процесу формування громад, а також враховано вимоги, які визначають її спроможність. На рис. 4 зображено логічну структуру системи формування спроможних ТГ.

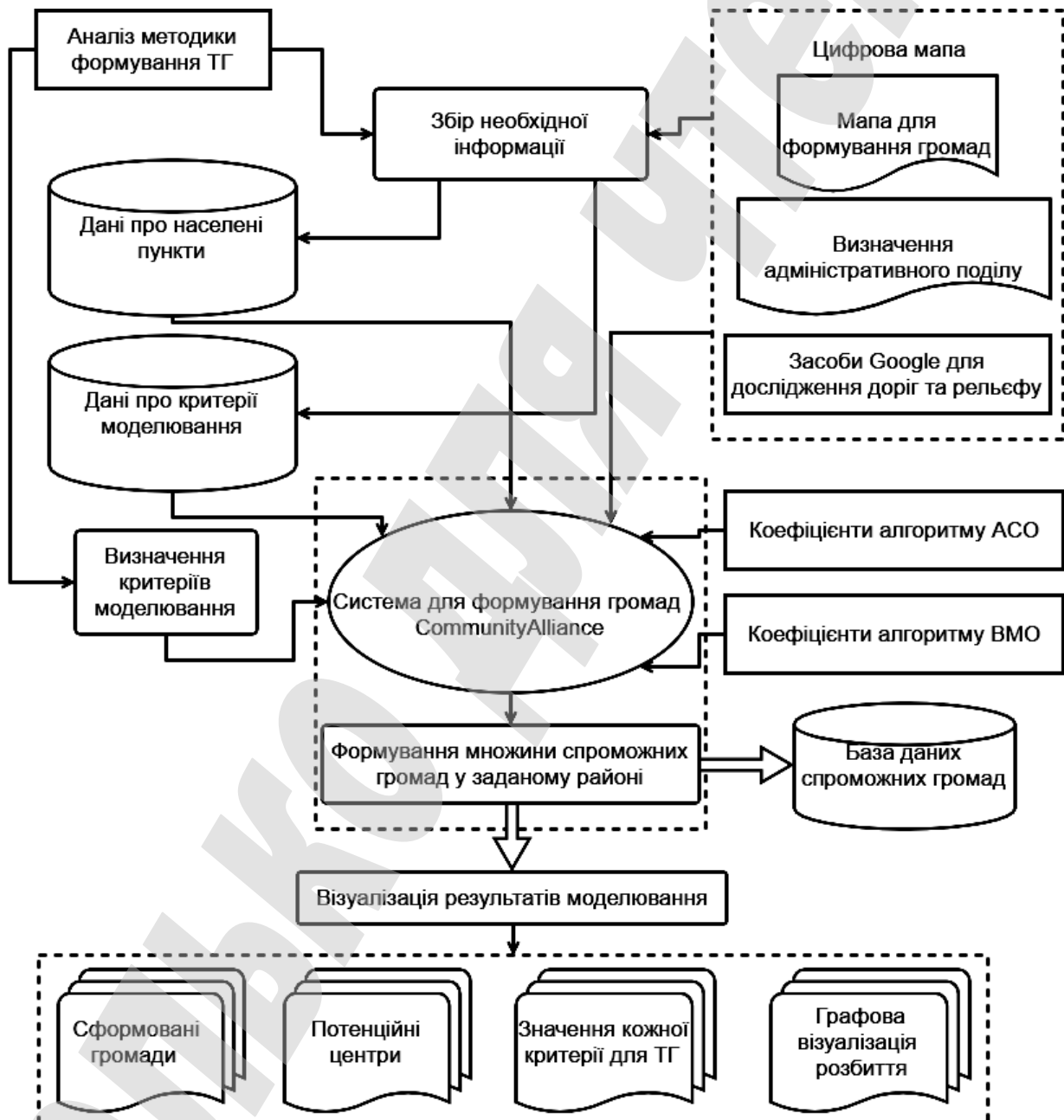


Рис. 4. Логічна структура програмної реалізації системи формування громад

Представлена структура являє собою архітектуру рішення, за допомогою якого можна спроектувати та реалізувати програмний продукт. Реалізація системи може складатись з таких етапів:

- аналіз затвердженої методики формування громад для вирішення мети, визначення очікуваних результатів розробки та створення предметної області;
- отримання даних, представлених у вигляді картографічної інформації, оскільки мапа це основний інструмент моделювання;
- застосування мапи для збору інформації про НП, поділ районів України, дослідження дорожньої сітки та рельєфу місцевості моделювання;
- використання існуючих систем Google для отримання даних про відстані між НП та про координати НП, та про їх межі;
- внесення даних про НП, серед яких буде проводитись моделювання в базу даних та визначення затверджених, ключових критеріїв визначення спроможності та занесення інформації про них у базу даних;
- для кожного окремого процесу моделювання визначення основних коефіцієнтів пошуку оптимальних розв'язків для алгоритмів АСО та МВО;
- створення програмного продукту для користування введеними даними та візуалізації результатів моделювання та занесення отриманих результатів у базу даних з можливістю їх подальшого аналізу та порівняння;
- візуалізація результатів моделювання на мапі для візуальної взаємодії та оцінки запропонованих рішень, відображення сформованих громад з вказуванням їх пропонованого центру, отримання результатів на мапі з відображенням значення кожного критерію, який використовувався у моделюванні та відображення результатів у вигляді графа.

Для визначення спроможності громади слід додати критерії, за якими буде вестись моделювання. Крім того, програма підтримує динамічну зміну параметрів, які будуть використовуватись під час визначення спроможності громади. Для цього можна додати нові критерії моделювання для дослідження отриманих результатів при різних увімкнених параметрах. Критерій має пріоритет, і також тип. Пріоритет буде використано під час моделювання. Доступні пріоритети наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Пріоритети для критеріїв моделювання

| № | Назва критерію | Значення |
|---|----------------|----------|
| 1 | Найнижчий | 0.2 |
| 2 | Низький | 0.4 |
| 3 | Нормальний | 0.6 |
| 4 | Високий | 0.8 |
| 5 | Найвищий | 1 |

Також критерій може мати один із зазначених нижче типів:

- заклади, що утримуються за рахунок бюджету органів місцевого самоврядування;
- приміщення для розміщення державних органів, установ, що здійснюють повноваження.

Для вирішення задачі формування спроможних громад, слід подати кожну зміну застосованих алгоритмів у формі, яка б використовувалась у програмній

реалізації кожного з вибраних алгоритмів. Розглянемо кроки, які необхідно виконати, для застосування алгоритму мурашиних колоній:

- за допомогою сервісу GoogleMaps DistanceMatrix треба отримати матрицю відстаней між усіма НП;
- ввести коефіцієнти α і β для використання особливостей алгоритму;
- ввести відстань, для критерію «Зона доступності НП до центру»;
- передати список НП, для яких проводиться моделювання;
- передати масив критеріїв, для яких виконується моделювання;
- визначити кількість ітерацій для роботи алгоритму.

В основі роботи алгоритму є цикл, умовою виходу з якого є перевищення кількості можливих ітерацій. На початку роботи алгоритму заповнюється матриця міток (феромонів), визначенням ймовірності переходу з одного НП в інший на основі наявності в НП призначення необхідних для формування ТГ критеріїв. Також усі мурахи-агенти розміщуються у кожному НП.

Наступним кроком є моделювання руху мурах. Для кожної мурахи визначається наступний пункт призначення на основі формули (1) з використання введених коефіцієнтів α і β , зчитуючи значення феромону і відстань між НП. Після того, як вибрано наступне місто, перевіряється наявність усіх необхідних критеріїв для формування громади. Якщо критеріїв достатньо, то мураха знайшла локальне рішення, і мураха завершує шлях до наступної ітерації циклу. Коли всі мурахи знайшли локальні рішення, проводиться процедура випаровування феромону для матриці міток. На основі пройденого шляху кожною мурахою, проводиться оновлення значень феромону. Для уникнення зациклення і симуляції зворотного зв'язку проводиться процедура випаровування феромону ще один раз.

Наступним кроком є збір усіх даних у мурах, які успішно знайшли локальні розв'язки. Серед вибраних НП вибирається центр ТГ на основі алгоритму Флойда-Уоршелла. Усі дані заносяться у асоціативний масив, ключем якого є номер агента в рої. Після завершення алгоритму усі зібрані дані аналізуються і здійснюється вибірка даних на основі якості пропонованого рішення кожною мурахою за час роботи алгоритму.

Для використання алгоритму зграї птахів (МВО) слід дотримуватись наступних кроків:

- ввести коефіцієнти C_1 і C_2 для використання особливостей алгоритму;
- визначити кількість ітерацій для роботи алгоритму.

Інші кроки аналогічні використанню АСО. На початку роботи алгоритму слід випадковим чином вибрати коефіцієнт швидкості і позицію кожного агента. Наступним кроком є моделювання переміщення часток у просторі, для цього за формулами (2) та (3) визначається вектор переміщення частки, враховуючи константу інерційності, яка зазвичай має значення 1. Для визначення максимального допустимого параметра швидкості, з усієї зграї вибирається агент з найбільшим значенням поточного рішення. За формулою (2) використовуючи коефіцієнти C_1 і C_2 визначається нова швидкість, а за (3) – позиція кожної окремої частинки.

Наступним кроком є сортування всього масиву часток для отримання найкращого агента, який пройшов найменший шлях, і на основі відвіданих НП якого, можна було б сформувати ТГ. Його позиція стає найкращою G для зграї.

Для аналізу найкращих рішень масив часток сортується за формулою (21) і вибирається найкраще рішення. Далі для аналізу цього рішення вибирається центр ТГ за алгоритмом Флойда-Уоршелла. Це рішення заноситься в асоціативний масив рішень для подальшого аналізу.

На основі оновленої швидкості за алгоритмом Фішера-Йейтса випадковим чином сортується пройдений шлях (масив відвіданих НП) кожного агента. І алгоритм повторюється для усіх агентів. Після сортування отримується пройдений шлях кожним агентом, змінений відповідно до вектора швидкості зграї. Після завершення роботи алгоритму, асоціативний масив сортується для кожного НП за якістю вибору центра громади для нього та здійснюється формування найкращого рішення.

Взаємодія між модулями включає всі класи системи. Але для процесу моделювання основними є лише ті класи, які беруть безпосередню участь у моделюванні. Динаміка взаємодії між об'єктами в часі у процесі формування громад зображена на рис. 5.

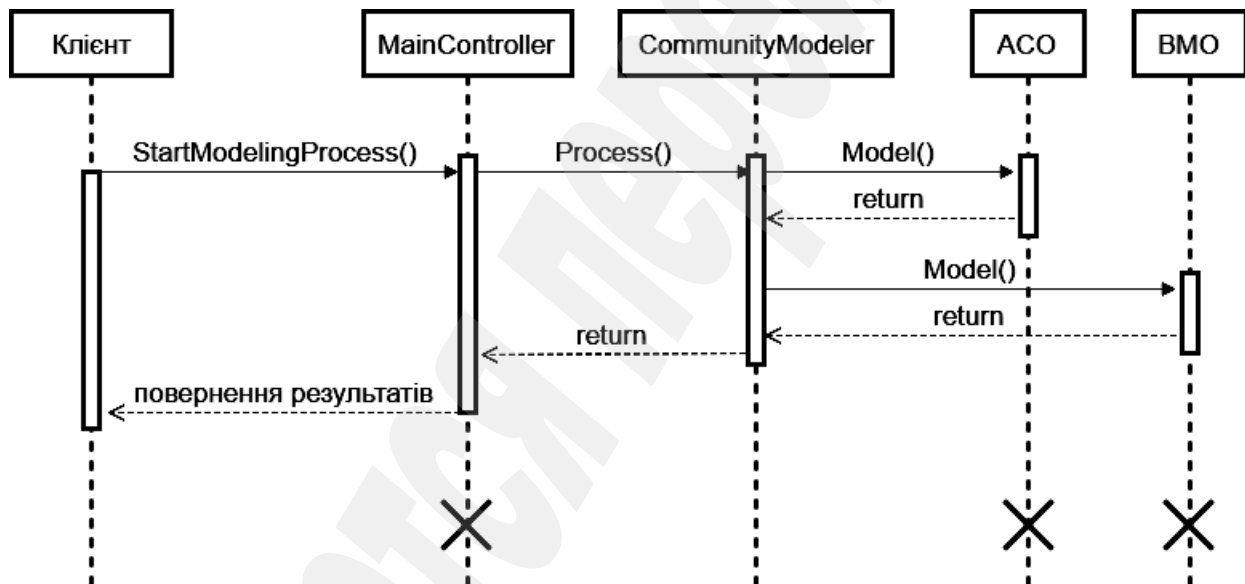


Рис. 5. Діаграма послідовності процесу моделювання територіальних громад

Наведена діаграма послідовності показує активність об'єктів у процесі моделювання.

6.5. Результати досліджень запропонованого підходу формування ТГ

У процесі розробки цієї сторінки було реалізовано можливість вибору НП, серед яких треба сформувати громади. Для цього слід вибрати НП, натискаючи на відповідні прапорці у крайній правій колонці таблиці. Після цього слід натиснути на кнопку «Змоделювати». Відкриється вікно, зображене на рис. 6. Натиснувши кнопку «Перейти до моделювання» користувач буде переміщений на сторінку «Мапа».

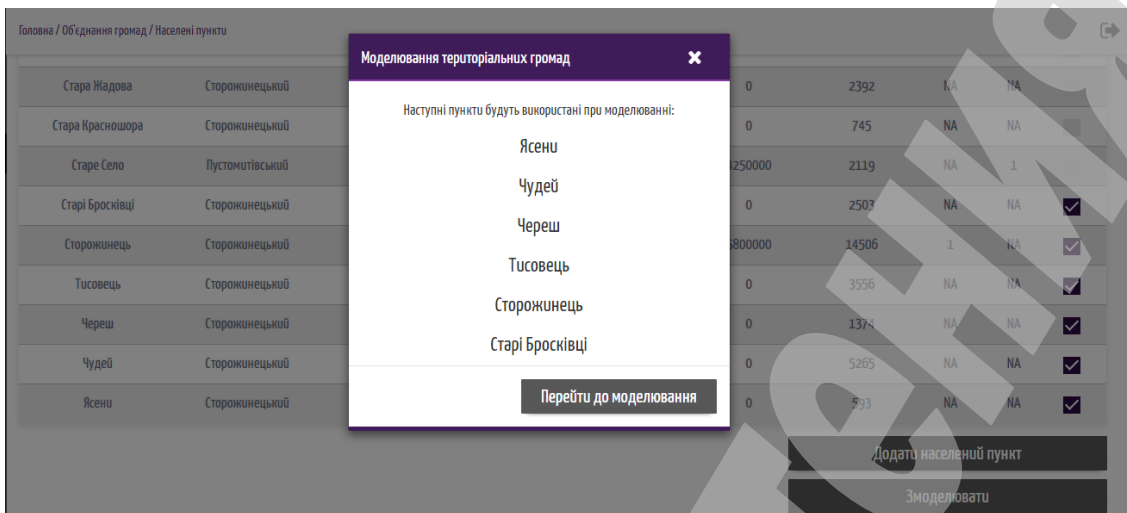
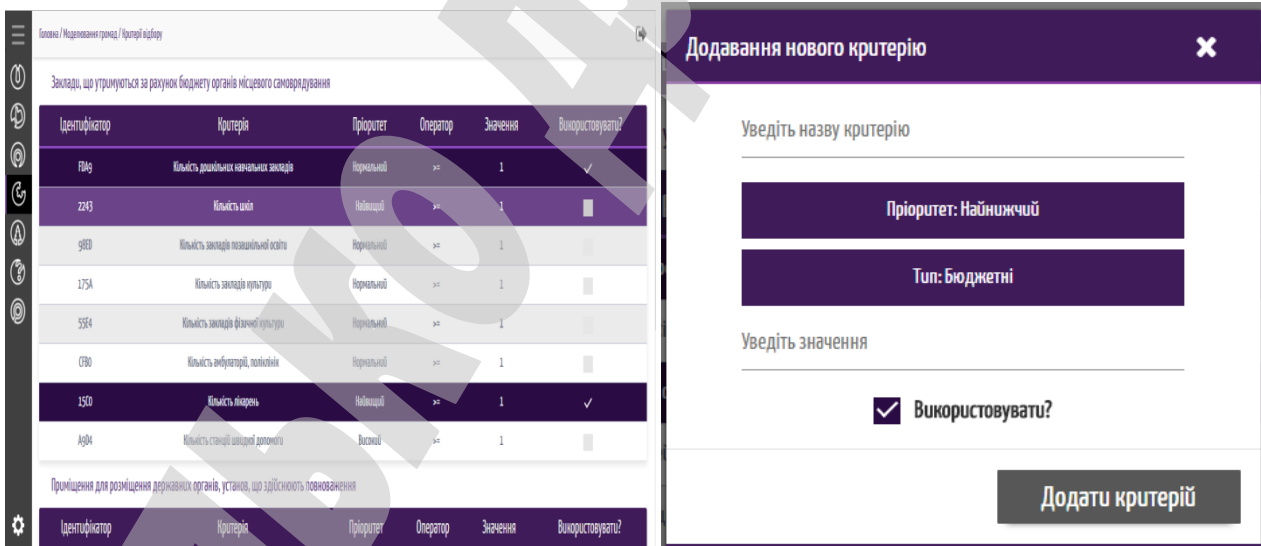


Рис. 6. Вікно «Моделювання територіальних громад»

Відкривши сторінку «Критерії відбору», користувач побачить усі додані критерії, які містяться у 3 категоріях. Таблиця містить усю інформацію про критерії. Натискаючи відповідні прапорці поля «Використовувати?» є можливість відключення критеріїв, в такому випадку тільки вибрані критерії будуть використовуватись для визначення спроможних громад. Дану сторінку показано на рис. 7, а. Для додавання нового критерію слід натиснути кнопку «Додати критерій» розташовану під основною таблицею. Натиснувши на клавішу відкривається вікно, зображене на рис. 7, б. Де потрібно ввести необхідну інформацію про критерій. Вибір пріоритету і типу критерії реалізовано за допомогою спадаючих списків.



а

б

Рис. 7. Критерії моделювання: *а* – вікно «Критерії відбору»;
б – вікно «Додавання нової критерії»

Перейти на сторінку «Мапа» можна вибравши НП на сторінці «Населені пункти» і натиснувши «Змоделювати», або натиснувши на посилання «Мапа». Майже всю область сторінки «Мапа» займає графічне представлення мапи, яка

відображається завдяки сервісу GoogleMaps і коду JavaScript. Інтерфейс для взаємодії з мапою зображено на рис. 8.

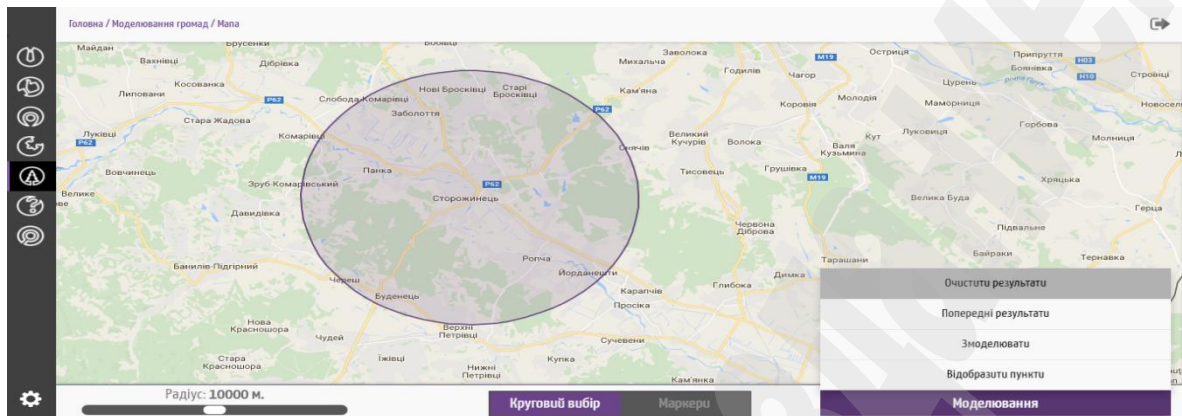


Рис. 8. Сторінка «Мапа»

Кнопка «Моделювання» представляє собою спадаючий список з 4 опціями:

«Відобразити пункти» – завантажує НП які знаходять в заданому радіусі. Результат дії кнопки продемонстровано на рис. 9, а;

«Змоделювати» – дозволяє почати процес моделювання. Відповідне вікно зображене на рис. 9, б;

«Попередні результати» – дозволяє переглянути результати попереднього моделювання;

«Очистити результати» – очищує всі маркери на мапі і всі результати.

Для початку моделювання слід ввести коефіцієнти алгоритму АСО та МВО і натиснути клавішу «Почати моделювання».

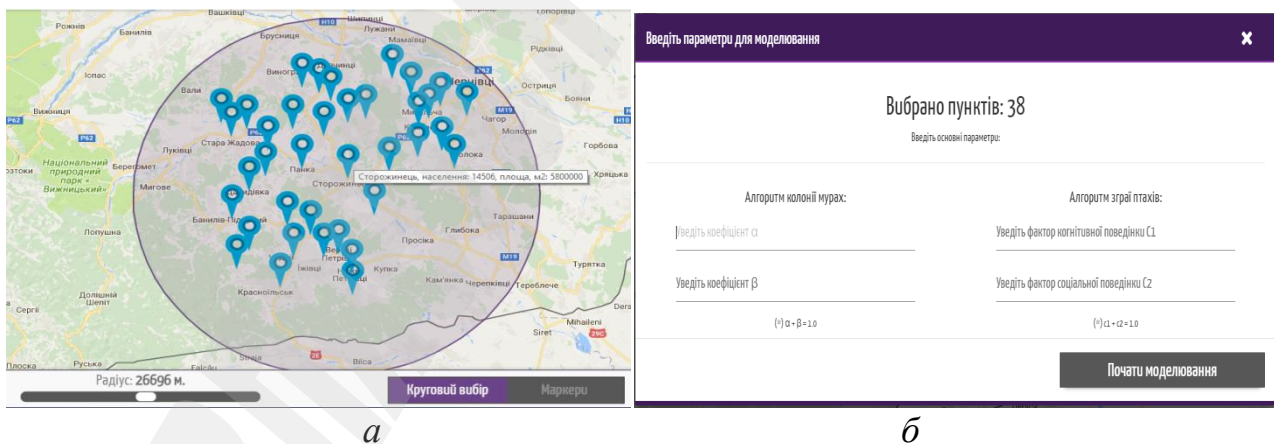


Рис. 9. Початок моделювання: а – вибрані населені пункти на мапі;
б – вікно початку процесу моделювання

Закінчивши моделювання, на сторінці з правого боку відображається висувна панель з результатами моделювання. Цю панель зображено на рис. 10, а. На панелі з результатами можна переключатись між результатами моделювання, запропонованими алгоритмами АСО та МВО. Результати зображено у вигляді таблиці з двома колонками. У першій – НП, які входять у пропоновану громаду, а у другій – центр.

Кнопка «Показати граф» зображує найкращий розв’язок у вигляді орієнтованих підграфів. Інтерфейс відображення графа реалізовано з використанням вікна, зображеного на рис. 10, б.

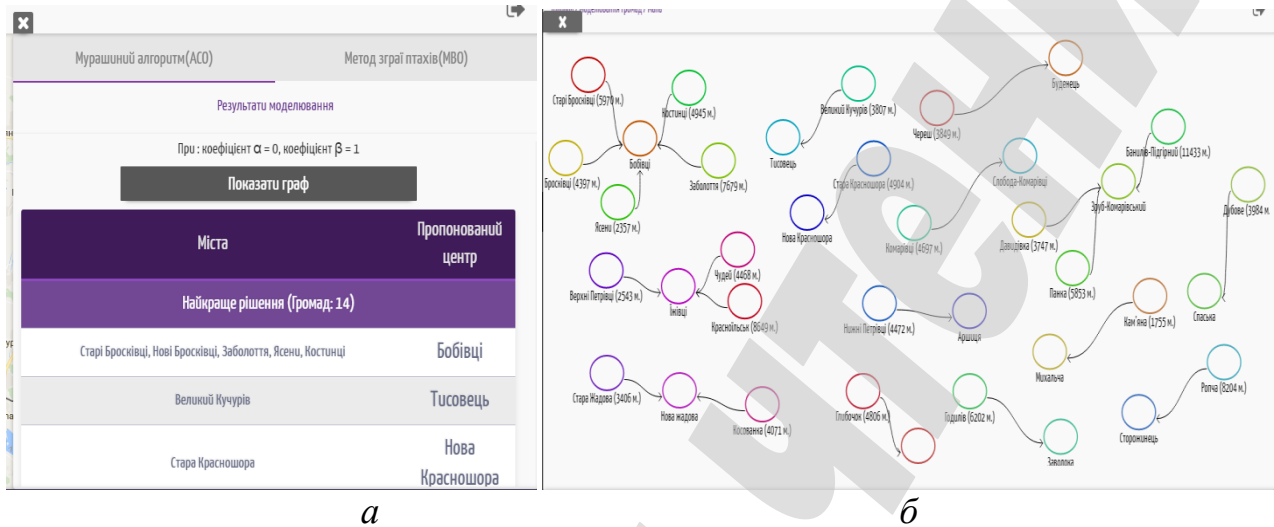


Рис. 10. Результати моделювання: а – вікно результатів; б – вікно графічного представлення результату

При роботі з результатами моделювання є можливість переглянути сформовані результати на мапі. Для цього слід натиснути на рядок з громадою. Для кожної громади випадковим чином вибирається колір для візуалізації на мапі. Центр громади позначається колом більшого розміру ніж кола для НП, які увійшли в ТГ. Натиснувши на коло центру громади можна переглянути інформацію про відповідну ТГ. Зокрема, які критерії використовувались для моделювання і відстані до НП, які увійшли до сформованої громади. Мапа з результатами моделювання показано на рис. 11, а. Вікно з інформацією про ТГ зображено на рис. 11, б.

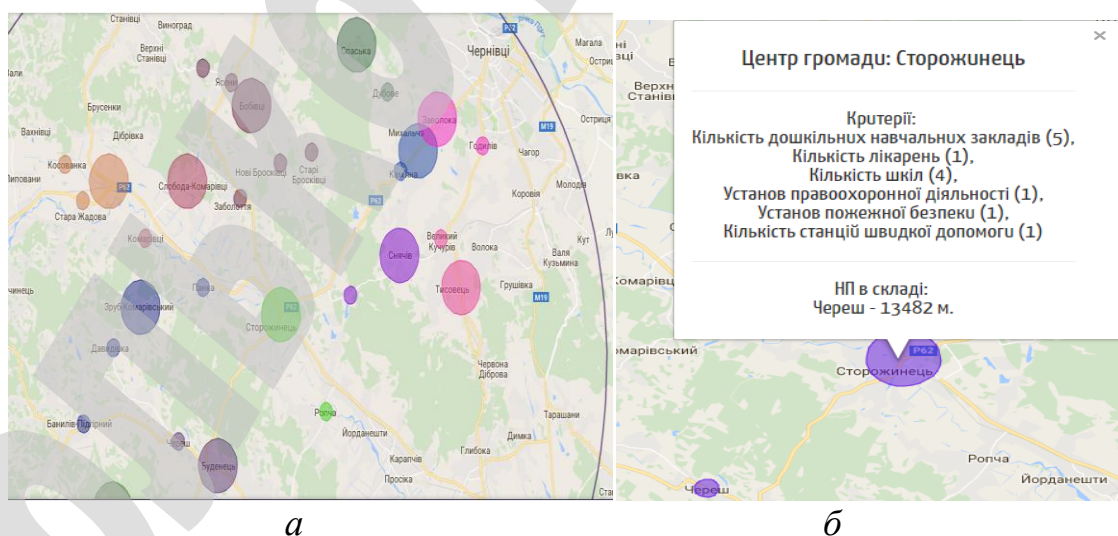


Рис. 11. Результати моделювання: а – відображення на мапі; б – вікно інформації про громаду

Для порівняння і аналізу результатів моделювання було передбачено можливість додавання існуючих громад. Крім того програмою підтримується отримання інформації про дві вибрані громади. Їх можна вибрати натискаючи на відповідний рядок. При виборі достатньої для порівняння кількості громад, з'являється кнопка «Порівняти», натиснувши на яку можна отримати інформацію про порівнювані ТГ (рис. 12).

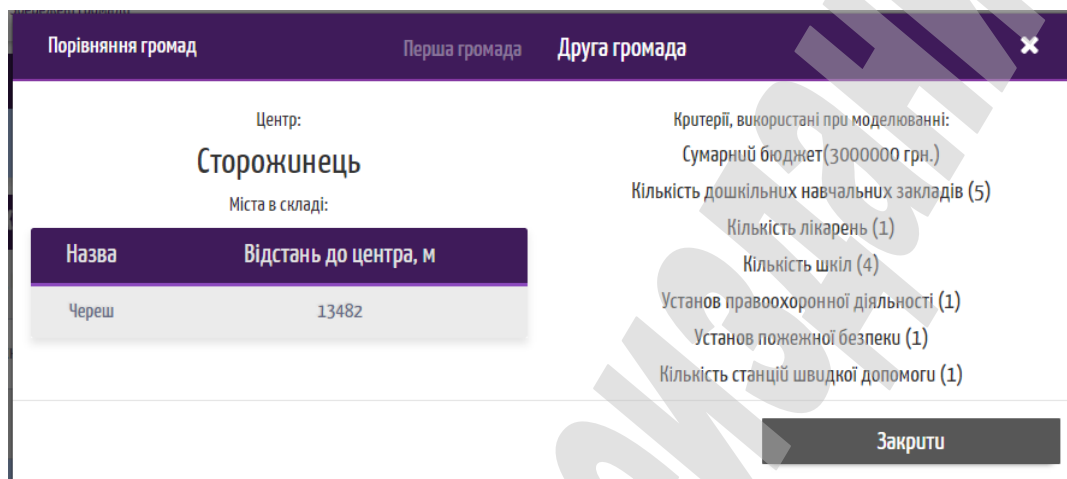


Рис. 12. Вікно «Інформація про громаду»

6.6. Тестування програмного продукту

Для тестування розробленого програмного продукту доцільно вибрати певний район України, і провести імітаційне моделювання планів об'єднання.

Прикладом тестування системи може бути завдання моделювання спроможних ТГ для окремої частини Чернівецької області. Адміністративно-територіальний устрій Чернівецької області наступний: 11 районів, 2 міста обласного значення, 2 міста районного значення, 398 сіл, та 8 СМТ.

Для моделювання територіальних громад та для дослідження результатів виконання програми використовуватиметься частина Сторожинецького району.

Для моделювання були вибрані наступні критерії:

- кількість шкіл ($S > 0$);
- кількість дошкільних навчальних закладів ($D > 0$);
- кількість лікарень ($L > 0$);
- кількість станцій швидкої допомоги ($SH > 0$);
- кількість установ правоохоронної діяльності ($V > 0$);
- кількість установ пожежної безпеки ($B > 0$);
- зона доступності НП до адміністративного центру 25 км.

Зазначені дані критеріїв для прикладу наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Вхідні дані для формування територіальних громад

| НП | Тип | S | D | L | SH | V | B | Бюджет, грн. |
|----------------|-------|-----|-----|-----|------|-----|-----|--------------|
| 1. Сторожинець | місто | 4 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5.000.000 |
| 2. Панка | село | 1 | – | – | – | – | – | 450.000 |
| 3. Череш | село | – | 2 | – | – | – | – | 800.000 |

| | | | | | | | | |
|----------------------|------|---|---|---|---|---|---|-----------|
| 4. Зруб-Комарівський | село | – | – | – | – | – | – | 500.000 |
| 5. Давидівка | село | 3 | – | 1 | – | 1 | – | 750.000 |
| 6. Комарівці | село | – | 1 | – | – | – | 1 | 1.000.000 |
| 7. Нова жадова | село | 1 | 1 | – | 1 | – | – | 1.200.000 |
| 8. Стара Жадова | село | 2 | – | 1 | – | 1 | – | 1.700.000 |

В табл. 3 зазначено інформацію про відстані між окремими НП, усі величини зазначено в метрах.

Таблиця 3

Відстані між населеними пунктами (НП) окремої частини Сторожинецького району Чернівецької області (Україна)

| НП | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0 | 7620 | 13482 | 13204 | 16938 | 13873 | 16578 | 20800 |
| 2 | 7620 | 0 | 21102 | 5853 | 9587 | 8431 | 11136 | 14200 |
| 3 | 13482 | 21102 | 0 | 10098 | 8197 | 27355 | 30060 | 32305 |
| 4 | 13204 | 5853 | 10098 | 0 | 3747 | 5973 | 11402 | 13647 |
| 5 | 16938 | 9587 | 8197 | 3747 | 0 | 9707 | 15136 | 14540 |
| 6 | 13873 | 8431 | 27355 | 5973 | 9707 | 0 | 5800 | 7674 |
| 7 | 16578 | 11136 | 30060 | 11402 | 15136 | 5800 | 0 | 3406 |
| 8 | 20800 | 14200 | 32305 | 13647 | 14540 | 7674 | 3406 | 0 |

Провівши ряд експериментів з використанням різних значень параметрів, необхідно знайти таке поєднання коефіцієнтів алгоритмів, при якому алгоритми видадуть найоптимальніше значення або найбільш близьке до нього в більшості випадків запуску алгоритмів. Рішення може бути не оптимальним і навіть одним з найгірших, проте через наявність випадковості у виборі розв'язків, алгоритми можуть видавати досить точний результат.

Для мурашиного алгоритму існує ряд параметрів, що впливають на ефективність його роботи:

- коефіцієнт врахування значення феромону при переході між вузлами α ;
- коефіцієнт врахування довжини ребер при переході між вузлами β ;
- параметр інтенсивності випаровування феромону P ;
- коефіцієнт оновлення феромону на переході Q .

В той же час для алгоритму зграї птахів основними є наступні параметри:

- коефіцієнт когнітивної поведінки C_1 ;
- коефіцієнт соціальної поведінки C_2 ;
- параметр інерційності агента ω .

Щоб визначити, наскільки набір значення коефіцієнтів впливає на результат роботи алгоритмів, необхідно використовувати варіювання значень параметрів. В розробленій системі коефіцієнтами, для яких можна ввести значення перед виконанням програми, є α , β , C_1 та C_2 , а значення параметрів P , Q , та ω динамічно змінюється протягом виконання програми.

На початку основні коефіцієнти алгоритмів мали такі значення: $\alpha=0,5$, $\beta=0,5$, $P=0,5$, $Q=1$; $C_1=0,5$, $C_2=0,5$, $\omega=1,05$.

Під час тестування буде досліджено вплив зміни параметрів на якість пропонуваного рішення, а значення основних коефіцієнтів буде змінюватись з деяким кроком. Для оцінки якості застосованих алгоритмів буде використано загальну довжину від центру L до кожного НП, який входить до громади, оскільки критерій «Зона доступності» визначає перспективність плану об'єднання перед його оприлюдненням. Окрім цього, доцільно дослідити сумарну величину доходів сформованої громади Q для оцінки можливості бюджетного розвитку та надання фінансової субвенції громаді. Ця оцінка критерію є важливою для складення кошторису сформованої громади і здійснення бюджетного моніторингу:

При використанні значень коефіцієнтів $\alpha=0,5$, $\beta=0,5$, $C_1=0,5$, $C_2=0,5$ було отримано результати, наведені у табл. 4, 5.

Таблиця 4

Пропоновані територіальні громади (ТГ) за алгоритмом АСО при $\alpha=0,5$, $\beta=0,5$

| Номер ТГ | НП, які увійшли у громаду | Пропонований центр ТГ | Q |
|----------|--|-----------------------|-----------|
| 1 | Давидівка, Зруб-Комарівський, Стара Жадова, Комарівці, Панка | Нова Жадова | 5.600.000 |
| 2 | Череш | Сторожинець | 5.800.000 |

Таблиця 5

Пропоновані територіальні громади (ТГ) за алгоритмом МВО при $C_1=0,5$, $C_2=0,5$

| Номер ТГ | НП, які увійшли у громаду | Пропонований центр ТГ | Q |
|----------|----------------------------------|-----------------------|-----------|
| 1 | Сторожинець, Череш, Давидівка | Зруб-Комарівський | 7.050.000 |
| 2 | Нова Жадова, Стара Жадова, Панка | Комарівці | 4.350.000 |

Використовуючи значення коефіцієнтів $\alpha=0$, $\beta=1$, $C_1=0$, $C_2=1$ було отримано результати, наведені у табл. 6, 7.

Таблиця 6

Пропоновані територіальні громади (ТГ) за алгоритмом АСО при $\alpha=0$, $\beta=1$

| Номер ТГ | НП, які увійшли у громаду | Пропонований центр ТГ | Q |
|----------|---|-----------------------|-----------|
| 1 | Нова Жадова, Комарівці, Стара Жадова, Зруб-Комарівський | Давидівка | 5.150.000 |
| 2 | Череш, Панка | Сторожинець | 6.250.000 |

Таблиця 7

Пропоновані територіальні громади (ТГ) за алгоритмом МВО при $C_1=0, C_2=1$

| Номер ТГ | НП, які увійшли у громаду | Пропонований центр ТГ | Q |
|----------|--|-----------------------|------------|
| 1 | Сторожинець, Панка, Давидівка, Комарівці, Череш, Стара Жадова, Нова Жадова | Зруб-Комарівський | 11.400.000 |

Увівши значення коефіцієнтів $\alpha=0,2, \beta=0,8, C_1=0,2, C_2=0,8$ було отримано результати, наведені у табл. 8, 9.

Таблиця 8

Пропоновані територіальні громади (ТГ) за алгоритмом АСО при $\alpha=0,2, \beta=0,8$

| Номер ТГ | НП, які увійшли у громаду | Пропонований центр ТГ | Q |
|----------|--|-----------------------|------------|
| 1 | Череш, Стара Жадова, Комарівці, Нова Жадова, Зруб-Комарівський, Давидівка, Панка | Сторожинець | 11.400.000 |

Таблиця 9

Пропоновані територіальні громади (ТГ) за алгоритмом МВО при $C_1=0,2, C_2=0,8$

| Номер ТГ | НП, які увійшли у громаду | Пропонований центр ТГ | Q |
|----------|--|-----------------------|------------|
| 1 | Сторожинець, Зруб-Комарівський, Давидівка, Панка, Череш, Нова Жадова, Стара Жадова | Комарівці | 11.400.000 |

Тестуючи вплив коефіцієнтів було введено наступні значення: $\alpha=0,7, \beta=0,3, C_1=0,7, C_2=0,3$, при цьому отримано результати, що наведені у табл. 10, 11.

Таблиця 10

Пропоновані територіальні громади (ТГ) за алгоритмом АСО при $\alpha=0,7, \beta=0,3$

| Номер ТГ | НП, які увійшли у громаду | Пропонований центр ТГ | Q |
|----------|--|-----------------------|-----------|
| 1 | Череш | Сторожинець | 5.800.000 |
| 2 | Панка, Нова Жадова, Стара Жадова, Комарівці, Зруб-Комарівський | Давидівка | 5.600.000 |

Таблиця 11

Пропоновані територіальні громади (ТГ) за алгоритмом МВО при $C_1=0,7, C_2=0,3$

| Номер ТГ | НП, які увійшли у громаду | Пропонований центр ТГ | Q |
|----------|--|-----------------------|-----------|
| 1 | Череш, Давидівка, Комарівці | Зруб-Комарівський | 2.500.000 |
| 2 | Сторожинець, Нова Жадова, Стара Жадова | Панка | 8.900.000 |

Проводячи тестування зі значеннями $\alpha=1,0, \beta=0, C_1=1,0, C_2=0$ було отримано результати, що наведені у табл. 12, 13.

Таблиця 12

Пропоновані територіальні громади (ТГ) за алгоритмом АСО при $\alpha=1,0, \beta=0$

| Номер ТГ | НП, які увійшли у громаду | Пропонований центр ТГ | Q |
|----------|--|-----------------------|-----------|
| 1 | Панка, Зруб-Комарівський, Комарівці, Нова Жадова | Давидівка | 3.900.000 |
| 2 | Стара Жадова, Череш | Сторожинець | 7.500.000 |

Таблиця 13

Пропоновані територіальні громади (ТГ) за алгоритмом МВО при $C_1=1,0, C_2=0$

| Номер ТГ | НП, які увійшли у громаду | Пропонований центр ТГ | Q |
|----------|--|-----------------------|-----------|
| 1 | Нова Жадова, Стара Жадова, Давидівка, Панка, Зруб-Комарівський | Комарівці | 5.600.000 |
| 2 | Череш | Сторожинець | 5.800.000 |

В табл. 14 наведено результати для комбінацій коефіцієнтів алгоритмів мурашиних колоній та зграї птахів.

Таблиця 14

Результати для різних комбінацій коефіцієнтів α, β та C_1, C_2

| № експерименту | Алгоритм мурашиних колоній | | | Алгоритм зграї птахів | | |
|----------------|----------------------------|---------|--------|-----------------------|-------|-------|
| | α | β | L | C_1 | C_2 | L |
| 1 | 0 | 1 | 64232 | 0.0 | 1.0 | 63924 |
| 2 | 0.2 | 0.8 | 100518 | 0.2 | 0.8 | 78442 |
| 3 | 0.5 | 0.5 | 60362 | 0.5 | 0.5 | 48583 |
| 4 | 0.7 | 0.3 | 66199 | 0.7 | 0.3 | 52774 |
| 5 | 1.0 | 0.0 | 70482 | 1.0 | 0.0 | 50696 |

Проведене тестування базується на аналізі даних, які були отримані стохастичним способом, завдяки особливостям алгоритмів АСО і МВО щодо пошуку найоптимальнішого розбиття району. Для порівняння отриманих даних, необхідно дослідити спроможні громади, які були б запропоновані робочою групою.

Керуючись методикою формування ТГ, для розглянутого прикладу еталонним рішенням може бути результат, наведений у табл. 15.

Таблиця 15

Пропоновані територіальні громади (ТГ) за методикою формування ТГ

| Номер ТГ | НП, які увійшли у громаду | Пропонований центр ТГ | Q | L |
|----------|--|-----------------------|-----------|-------|
| 1 | Нова Жадова, Стара Жадова | Комарівці | 3.900.000 | 64718 |
| 2 | Череш, Давидівка, Панка, Зруб-Комарівський | Сторожинець | 7.500.000 | |

Найоптимальніше рішення базується на мінімізації відстані між НП та центром ТГ. На рис. 13 графічно відображено результати експериментів.

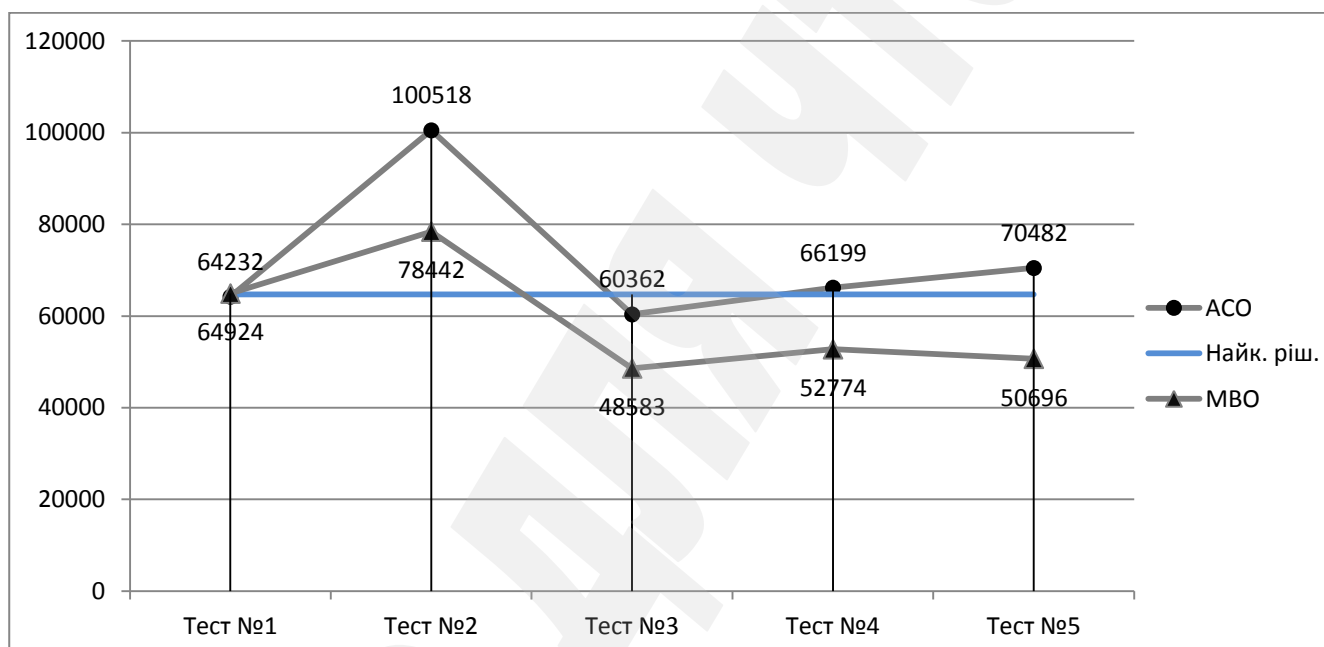


Рис. 13. Вплив зміни параметрів на якість рішення алгоритмами

Досліджуючи вплив параметрів на якість отримання найоптимальнішого розбиття району, можна зробити висновок, що зміна значень коефіцієнтів значно впливає на якість пропонованого рішення. В методиці вказано, що формування спроможних ТГ в заданому районі має відбуватись розділенням повноважень між НП, які можуть надавати всі необхідні послуги, вибираючи при цьому центрами громад НП, які мають найменшу сумарну відстань до кожного НП в громаді, це показує специфіку задачі формування ТГ.

Алгоритм колонії мурах продемонстрував, що при збільшенні його коефіцієнта β найоптимальніші розв'язки опираються на відстані між окремими НП серед яких можливо сформувати громади. При $\beta=1$, алгоритм показав «жадність» до врахування відстані між НП. При великих значеннях α отримане рішення значно залежить від феромону на шляху. При $\alpha=1$, вибір НП не опирається на значення відстані при

формуванні ТГ. Найоптимальніший розв'язок було отримано, використовуючи значення $\alpha=0,5$, $\beta=0,5$.

Алгоритм зграї птахів показав, що зменшуючи коефіцієнт впливу C_2 алгоритм опирався на локальні розв'язки агента, зменшуючи сумарну відстань до НП в громаді. Зменшуючи коефіцієнт локального оптимуму C_1 , формування громад опиралось на загальний розв'язок, який знайдений зграєю, що давало збільшення області ТГ через залучення нових НП до сформованих громад. Найоптимальніший розв'язок було отримано, використовуючи значення $C_1=1$, $C_2=0$ тому, що він продемонстрував оптимальний вибір центрів ТГ.

Отримані результати необхідно досліджувати на практиці для конкретних районів України. Фінальний результат може бути не найкращим, він лише демонструє застосування методів для вирішення задачі. Специфіка задачі формування ТГ передбачає врахування всіх НП, серед яких необхідно змодельовати ТГ, обираючи центром ті НП, до яких можна дістатись навіть з найдальших НП. Доцільно перезапускати алгоритми, поки не буде знайдено кращого розв'язку за попередній.

Можна переконатись, що незалежно від вибору центру громади, абсолютно всі ТГ мають критерії визнання спроможності, множина яких визначена на початку тестування. Що стосується сумарної кількості бюджету ТГ, то в процесі тестування цей параметр динамічно змінювався. Аналіз розв'язків демонструє схожий розподіл ресурсів, що дає змогу побудувати ефективну систему управління, направлену на розвиток усіх сформованих ТГ.

Проведені дослідження базуються на даних, які були отримані стохастичним способом через специфіку роботи алгоритмів ройового інтелекту. Здійснення їх аналізу, і визначення найкращого рішення може стати підґрунтям для обґрунтування спроможності сформованих громад. Запропоновані методи показали ефективність на прикладі формування спроможних ТГ для частини Сторожинецького району Чернівецької області (Україна).

6.7. Перспективні напрями вдосконалення програмної реалізації

В процесі розробки програми було адаптовано 2 алгоритми ройової оптимізації для вирішення задачі формування громад. Але недоліком є те, що не всі характеристики, які можуть впливати на прийняття рішення, було враховано. В подальшому, для кращої роботи алгоритму можна було б включити до оптимізаційної задачі наступні обмеження:

- загальна площа ТГ, що формується;
- кількість населення в громаді;
- розклад руху транспортних засобів (потяги, автобуси тощо).

Що стосується застосованих алгоритмів вирішення, то можна було покращити алгоритм АСО, додавши застосування елітних мурах, їх кількість, частоту запуску. «Елітні» мурахи-агенти пересуваються по графу так само як звичайні агенти. Мета їх запуску – це збільшення значень міток на з'єднаннях, що входять до знайденої сукупності кращих результатів, та, відповідно, відсіювання занадто довгих маршрутів. Але кількість та частота запуску елітних мурах-агентів ще не є до кінця дослідженими, бо при частому їх використанні можуть залишитись нерозглянутими розв'язки, які б входили до потенційно оптимальних маршрутів.

Що стосується алгоритму зграї птахів, то перспективним напрямком є гібридизація алгоритму з іншими методами пошуку оптимуму, зокрема, локальним пошуком, методом переміщення бактерій і генетичними алгоритмами.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. Сильною стороною у проведеному дослідженні є аналіз інформаційних технологій та алгоритмів, які використовуються при формуванні спроможних територіальних громад в Україні. Також важливим є адаптація алгоритмів колективного інтелекту для вирішення задачі формування громад у заданому районі. Гнучкість зміни параметрів, які використовуються для моделювання, зокрема критеріїв, які визначають спроможність ТГ і максимальної відстані дорогою з твердим покриттям, дозволяє динамічно змінювати пропоновані програмою плани об'єднання. Завдяки цьому, систему можна налаштувати для використання з конкретними областями України.

Weaknesses. Слабкою стороною є те, що кожний окремий район моделювання має свій певний набір критеріїв визначення спроможності, до яких треба адаптуватись. Тобто алгоритм доцільно запускати декілька разів для виявлення найкращого рішення. Також моделювання проводиться на основі геоінформаційних карт, які мають бути досить достовірними та актуальними для отримання більш точного результату розбиття району при формуванні спроможних громад.

Opportunities. Можливостями для подальших досліджень є переймання досвіду країн Євросоюзу в питаннях формування територіальних громад, вивчення технологій та методів, що використовуються при дослідженні даного питання для впровадження у метод можливості адаптування до різних типів територіального розподілу тої чи іншої країни.

Threats. Складність із впровадження отриманих результатів дослідження є те, що в Україні відбувається багато змін на рівні соціуму, зміна потреб населення, проведення багатьох реформ різного типу у зв'язку із інтеграцією України в Євросоюз. Всі нижче перелічені аспекти впливають на доцільність запропонованого методу формування спроможних територіальних громад, тому що існують різні типи територіального устрою.

Таким чином, SWOT-аналіз виявив необхідність вдосконалення системи впровадження можливості адаптації запропонованого методу формування ТГ до районів з різними типами адміністративно-територіального устрою.

8. Висновки

1. Побудована математична модель процесу утворення територіальної громади за допомогою адаптованих алгоритмів колонії мурах та зграї птахів. Використані методи пропонують найоптимальніше розбиття району, розв'язуючи багатокритеріальну оптимізаційну задачу. Завдяки динамічній зміні множини критеріїв визначення спроможності алгоритм можна застосувати у різних районах моделювання.

Система працює наступним чином. Для початку роботи з програмою потрібно у базу даних занести населені пункти, які будуть використовуватись

під час моделювання. Для визначення спроможності громади слід додати критерії, за якими буде вестись моделювання. Також, задаються основні коефіцієнти застосованих алгоритмів. Коли результати отримано, вони відображаються у вигляді графів.

2. Визначена інформація та набір критеріїв оцінювання спроможності територіальної громади у районі моделювання. Алгоритм колонії мурах використовує критерії для регулювання кількості феромону між НП. Алгоритм зграї птахів використовує кількість критеріїв в НП для координації руху та оновлення вектора швидкості зграї. Таким чином, адаптовані алгоритми порізному використовують доступну інформацію. Гнучкість основних коефіцієнтів дозволяє контролювати якість пропонованого розв'язку.

3. Для отримання достовірного розв'язку важливим є застосування актуальної мапи місцевості для визначення відстані між НП. Потенційний центр громад визначається враховуючи множину критеріїв у громаді і сумарні відстані між НП у громаді. Особливістю застосованих алгоритмів є те, що вони динамічно пристосовуються до району моделювання, тобто відстань між містами та критерії моделювання можуть змінюватись у процесі роботи.

4. Пропонований метод протестований на прикладі формування територіальних громад у Сторожинецькому районі Чернівецької області (Україна). Результатом тестування є аналіз отриманих у результаті 5 експериментів з різними комбінаціями коефіцієнтів даних. Результати показали ефективність формування спроможних ТГ при деяких визначених обмеженнях. Здійснення їх аналізу і визначення найкращого рішення може стати підґрунтям для обґрунтування спроможності сформованих громад.

Література

1. On the Voluntary Association of Territorial Communities [Electronic resource]: Law of Ukraine from February 5, 2015 No. 157-VIII. – Available at: \www/URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/157-19>

2. Approval of the Methodology for the formation of capable territorial [Electronic resource]: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine from April 8, 2015 No. 214. – Available at: \www/URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/214-2015-п>

3. Pandian, P. Determining efficient solutions to multiple objective linear programming problems [Text] / P. Pandian, M. Jayalakshmi // Applied Mathematical Sciences. – 2013. – Vol. 7. – P. 1275–1282. doi:[10.12988/ams.2013.13118](https://doi.org/10.12988/ams.2013.13118)

4. Galchenko, V. Ya. Populiationnyye metaevristicheskie algoritmy optimizatsii roem chastits [Text]: Handbook / V. Ya. Galchenko, A. N. Yakimov. – Cherkassy: FLP Tretiakov A. N., 2015. – 160 p.

5. Karpenko, A. P. Sovremennyye algoritmy poiskovoi optimizatsii. Algoritmy, vdohnovlennyye prirodoi [Text]: Handbook / A. P. Karpenko. – Moscow: MSTU n. a N. E. Bauman, 2014. – 446 p.

6. Del Valle, Y. Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems [Text] / Y. del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J.-C. Hernandez, R. G. Harley // IEEE Transactions on Evolutionary

- Computation. – 2008. – Vol. 12, No. 2. – P. 171–195. doi:[10.1109/tevc.2007.896686](https://doi.org/10.1109/tevc.2007.896686)
7. Parsopoulos, K. E. Multi-Objective Particles Swarm Optimization Approaches [Text] / K. E. Parsopoulos, M. N. Vrahatis // Multi-Objective Optimization in Computational Intelligence. – IGI Global, 2008. – P. 20–42. doi:[10.4018/978-1-59904-498-9.ch002](https://doi.org/10.4018/978-1-59904-498-9.ch002)
8. Coello, C. A. C. An Introduction to Multi-Objective Particle Swarm Optimizers [Text] / C. A. C. Coello // Advances in Intelligent and Soft Computing. – Springer Berlin Heidelberg, 2011. – P. 3–12. doi:[10.1007/978-3-642-20505-7_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20505-7_1)
9. Dorigo, M. The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications, and Advances [Text] / M. Dorigo, T. Stützle // Handbook of Metaheuristics. – Kluwer Academic Publishers, 2003. – P. 250–285. doi:[10.1007/0-306-48056-5_9](https://doi.org/10.1007/0-306-48056-5_9)
10. Gan, R. Improved ant colony optimization algorithm for the traveling salesman problems [Text] / R. Gan, Q. Guo, H. Chang, Y. Yi // Journal of Systems Engineering and Electronics. – 2010. – Vol. 21, No. 2. – P. 329–333. doi:[10.3969/j.issn.1004-4132.2010.02.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-4132.2010.02.025)
11. Adubi, S. A. A comparative study on the ant colony optimization algorithms [Text] / S. A. Adubi, S. Misra // 2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO). – IEEE, 2014. doi:[10.1109/icecco.2014.6997567](https://doi.org/10.1109/icecco.2014.6997567)
12. SinghJadon, R. Modified Ant Colony Optimization Algorithm with Uniform Mutation using Self-Adaptive Approach [Text] / R. SinghJadon, U. Dutta // International Journal of Computer Applications. – 2013. – Vol. 74, No. 13. – P. 5–8. doi:[10.5120/12943-9931](https://doi.org/10.5120/12943-9931)
13. Yang, X.-S. Efficiency Analysis of Swarm Intelligence and Randomization Techniques [Text] / X.-S. Yang // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2012. – Vol. 9, No. 2. – P. 189–198. doi:[10.1166/jctn.2012.2012](https://doi.org/10.1166/jctn.2012.2012)
14. Pang, S. An Improved Ant Colony Optimization with Optimal Search Library for Solving the Traveling Salesman Problem [Text] / S. Pang, T. Ma, T. Liu // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2015. – Vol. 12, No. 7. – P. 1440–1444. doi:[10.1166/jctn.2015.3910](https://doi.org/10.1166/jctn.2015.3910)
15. Wang, X. Improved multi-objective ant colony optimization algorithm and its application in complex reasoning [Text] / X. Wang, Y. Zhao, D. Wang, H. Zhu, Q. Zhang // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2013. – Vol. 26, No. 5. – P. 1031–1040. doi:[10.3901/cjme.2013.05.1031](https://doi.org/10.3901/cjme.2013.05.1031)