

УДК 681.03

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ВИБОРУ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ СКЛАДУ ЕКСПЕРТНИХ ГРУП

І.Н. Вдовиченко, О.М. Маркова*Department of Computer Systems and Networks, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine**ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0953-655X>**ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5236-6640>**E-mail: vivin2015@nu.edu.ua*

АНОТАЦІЯ

Статтю присвячено розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі – розробці й обґрунтуванню комбінованого методу формування експертних груп, алгоритм роботи якого інтегрує статистичні підходи, математичне моделювання, методи експертних оцінок та апарат генетичних алгоритмів. У роботі обґрунтовано необхідність оптимізації процесу відбору експертів для мінімізації помилок під час проведення експертизи.

Запропоновано комплексну схему формування оптимального складу експертної групи, яка базується на системному поєднанні кількісних та якісних показників. У межах дослідження формалізовано складну оптимізаційну задачу багатокритеріального підбору фахівців для проведення технічних, соціальних та економічних експертиз. Представлено схему комбінації статистичних методів та генетичного алгоритму для формування експертних груп. Математична модель задачі базується на максимізації цільової функції, що враховує низку критичних параметрів: індивідуальний індекс компетентності експерта, коефіцієнт професійного досвіду, ступінь узгодженості попередніх оцінок кандидата та ін.

Особливу увагу приділено застосуванню генетичних алгоритмів для пошуку оптимальних рішень у великому просторі альтернатив. Використання еволюційних механізмів відбору, мутації та кросинговеру дає можливість ефективно вирішувати задачу багатокритеріального вибору, забезпечуючи високу точність формування груп. Отримані результати підтверджують, що синтез генетичних алгоритмів з експертними та математичними методами дає змогу суттєво підвищити надійність прогнозів та оптимізує прийняття рішень.

Ключові слова: генетичні алгоритми, експертиза, експертна група, комбінований метод, експертна оцінка оптимальне рішення, багатокритеріальна оптимізація, склад групи, математичні, статистичні методи, хромосоми, ген, схрещення, мутація, цільова функція.

Вступ

Теорія оптимізації охоплює практично всі сфери людської діяльності, виходячи далеко за межі суто технічних завдань. Одним із перспективних інструментів тут стали генетичні алгоритми (ГА) як один із ключових методів еволюційних обчислень. Однак, попри свою ефективність у пошуку оптимальних рішень, вони мають і недоліки: складність обробки нелінійних функцій через ризик потрапляння в локальні екстремуми та стрімке зростання обчислювальних витрат у разі збільшення кількості параметрів.

Останнім часом важливість завдань, коли доводиться вибирати компромісні рішення щодо складних

об'єктів, значно зростає. Це пояснюється зростанням динамізму довкілля та зменшенням періоду часу на аналіз ситуації прийняття рішень. Також розвиток науки і техніки призвів до появи великої кількості альтернативних варіантів вибору. Далися взнаки і збільшення взаємозалежності різних рішень та їх наслідків, зростає складність варіантів прийнятих рішень. У цих умовах для прийняття рішень дедалі частіше використовуються експертизи. Експертні методи є ефективним інструментом аналізу об'єктів, побудови прогнозів, визначення їхньої якості та цінності.

Як показує практика, не так просто інтуїтивні й евристичні рішення різних завдань отримати за

допомогою формалізованих розрахункових методів. У складних сферах життєдіяльності людини створення експертних систем – завдання неймовірно важке. Проблема полягає в тому, щоб отримати знання від експертів, і в тому, щоб формалізувати їх знання, упорядкувати та передбачити адекватну відповідь на поставлене запитання. Певні експертні методи застосовують тоді, коли використання інших виявляється неможливим чи не економічним, за їх допомогою намагаються досліджувати й моделювати процес людського мислення.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Експертизі, як комплексу логічних та математико-статистичних методів організації роботи зі спеціалістами-експертами й обробки думок експертів, виражених у кількісній або якісній формі, приділено багато уваги в роботах науковців. Такі вчені, як Ю. І. Саенко В. М. Ворона, Ю. М. Бородянський, з київського інституту кібернетики та київського інституту соціології, неодноразово в своїх роботах порушували питання проблем і класифікації експертних методів. Вони відмічали, що застосування експертних методів є актуальним в оцінці багатьох процесів.

Питання використання генетичних алгоритмів для вирішення задач оптимізації (до яких і належать багато завдань експертизи) розглядалися на форумах і в науковій літературі вже декілька років.

В. О. Бабенко, О. К. Носовець у роботі [1] пропонують алгоритм для знаходження рішень багатокритеріальної задачі оптимізації, комбінуючи метод аналізу ієрархій та генетичні алгоритми.

Т. Л. Будорацька, Н. М. Журавльова в роботі [2] відмічають, що результати, отримані із застосуванням ГА, наближені до показників, розрахованих класичними методами, а в деяких випадках рішення є оптимальнішим.

К. В. Колесніков у роботі «Генетичні алгоритми для задач багатокритеріальної оптимізації в мережах адаптивної маршрутизації даних» демонструє застосування генетичних алгоритмів для розв'язання складних оптимізаційних задач, зокрема пошуку шляхів за кількома критеріями. Очевидно, що наукові роботи підтверджують актуальність питання, але вирішення проблеми формування експертної групи на базі генетичного алгоритму не розглядалося.

Мета та задачі дослідження

Мета дослідження полягає в аналізі особливостей використання генетичного алгоритму для розв'язання оптимізаційних задач багатокритеріального вибору альтернатив і проведення експерименту.

Звідси випливає, що мета роботи полягає у дослідженні стану питання експертизи, побудові

комплексної методики багатокритеріального оцінювання альтернатив та можливості застосуванні її для формування експертної групи.

Для досягнення мети дослідження, потрібно виконати такі завдання:

- проаналізувати запропонований алгоритм формування експертної групи на базі математичних методів;

- дослідити використання основних принципів роботи генетичних алгоритмів і методів їх застосування під час розв'язання оптимізаційних багатокритеріальних задач;

- розробити алгоритм, який комбінує статистичні, математичні й експертні методи з використанням генетичного підходу, для покращення результатів оптимізації;

- провести серію експериментів для визначення ефективності запропонованого алгоритму в задачі формування складу експертної групи;

- зробити порівняльний аналіз отриманих результатів з більш традиційними, розробленими автором раніше, підходами розв'язування задачі формування складу експертних груп.

Матеріали та методи досліджень

Натомість експертиза не може розглядатися як вичерпний рівень аналізу. Актуальним стає прагнення поєднувати експертизу з фундаментальними дослідженнями. Складності, що виникають у процесі здійснення експертизи, визначаються насамперед тим, що функціонування об'єкта що підлягає експертизі, відбувається під впливом великої кількості факторів. Однак за традиційного підходу немає об'єктивної впевненості в тому, що вибраний варіант, дійсно, є кращим. Ба більше, в умовах багатоваріантності та пов'язаного із цим (за законами комбінаторики) зростання потенційно можливих варіантів рішень дійсно оптимальний варіант може зникнути з поля зору дослідників та експертів.

З огляду на це виникає потреба в розробці науково обґрунтованої методології та принципів проведення експертизи, застосування яких можливе лише в разі широкого використання математичних методів та ПЕОМ. Головні труднощі – відсутність математичних і формально логічних засобів, здатних із достатньою точністю відобразити в кількісних показниках якісний зміст процесів.

Незважаючи на успіхи, досягнуті в останні роки в розробці та практичному використанні методу експертних оцінок, є низка проблем і завдань, що потребують подальших методологічних досліджень та практичної перевірки. Одне з найважливіших питань – формування експертних груп. Необхідно вдосконалювати систему відбору експертів. Очевидно, що має бути створений узагальнений метод

відбору експертів, у якому були б використані всі позитивні особливості існуючих експертних, статистичних методів, методів штучного інтелекту та виключені їхні недоліки.

Формування складу експертної групи, стандартний підхід

Ми пропонуємо схему формування експертної групи, яка представлена рис. 1. Як показав аналіз схеми, це процес комплексний, складний, у якому задіяно багато різних методів та підходів. Для

формування оптимального складу експертної групи потрібно провести понад 6 окремих повноцінних опитувань зі складною математичною обробкою результатів, понад 10 окремих багатофакторних статистичних і математичних аналізів та розрахунків. Враховуючи складність формування експертної групи, невизначеність формування деяких суттєвих ознак, недостатню повноту інформації та неможливість повної математичної формалізації процесу вирішення поставленого завдання, потрібно використовувати комбіновані підходи до вирішення [10].

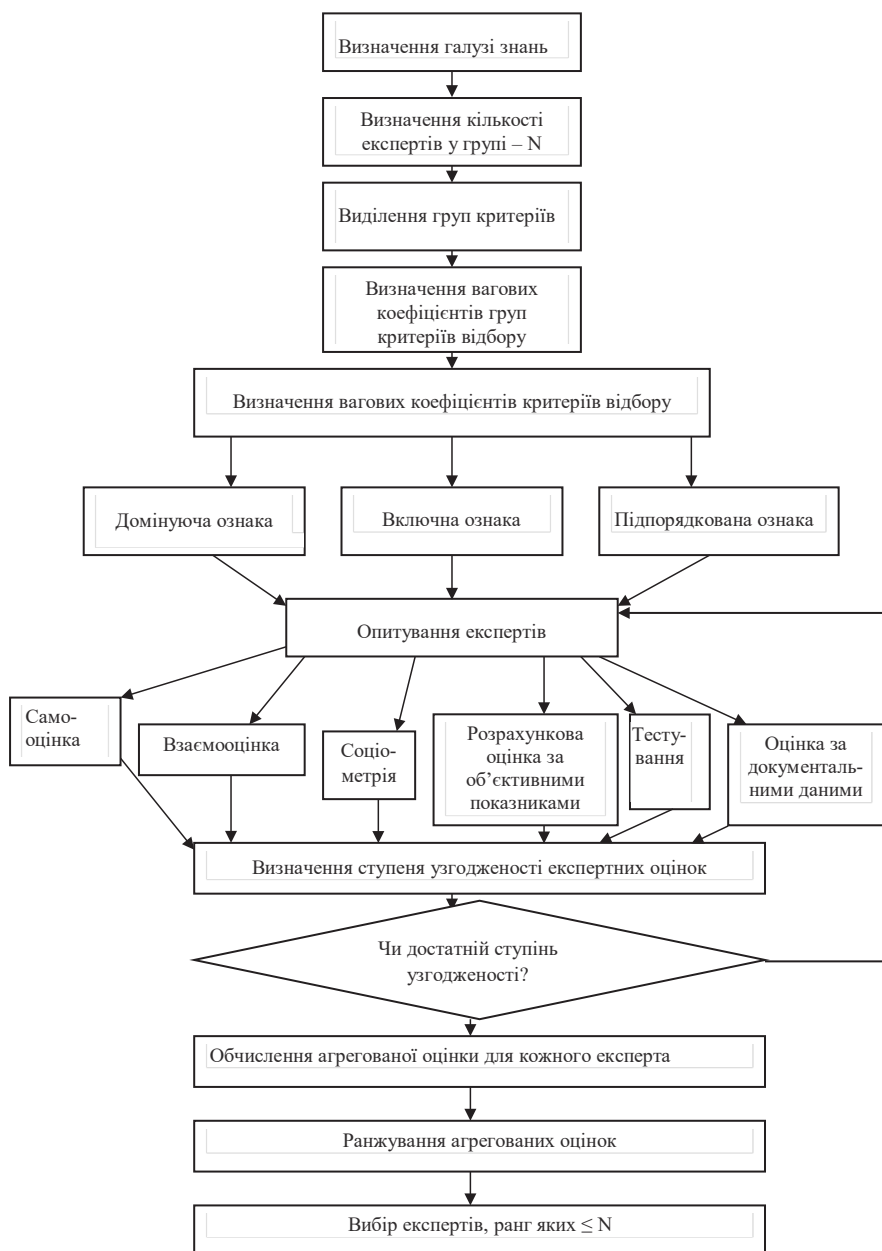


Рис. 1. Комплексна схема формування оптимального складу експертної групи

Як варіант знаходження оптимального рішення цієї багатокритеріальної задачі ми пропонуємо використовувати генетичний алгоритм.

Механізм ГА нагадує біологічну еволюцію, він ґрунтується на таких операціях еволюції, як відбір, схрещування та мутація. Генетичні алгоритми добре зарекомендували себе як методи пошуку в багатьох сферах практично за повної відсутності інформації про властивості цільової функції і обмежень. У різних дослідженнях було розроблено декілька методів і підходів використання генетичних алгоритмів для вирішення багатокритеріальної оптимізації.

ГА можуть насамперед вирішити проблеми, для яких немає точного аналітичного розв'язку або у яких великий розмір та складність. Крім того, генетичні алгоритми є гнучкими і їх можна легко адаптувати до різноманітних задач та вимог.

Сучасний розвиток генетичних алгоритмів, зокрема впровадження нових операторів мутації, кросинговеру та вдосконалення відбору, значно розширив їхні можливості у розв'язанні складних задач. В основі ГА лежить популяційний підхід, де кожен розв'язок моделюється як хромосома. Процес пошуку оптимального результату є ітеративним еволюційним процесом, що охоплює зміну поколінь. На кожному етапі придатність хромосом оцінюється за допомогою цільової функції. Еволюційний відбір забезпечує пріоритетне відтворення найбільш адаптованих особин, що призводить до поступового зростання середньої пристосованості популяції та збіжності алгоритму до глобального оптимуму [2; 5]. Процес пошуку рішення має такі етапи:

1. Налаштування параметрів генетичного алгоритму: встановлення розміру популяції хромосом, встановлення максимальної кількості поколінь (за потреби), визначення кількості генів у хромосомах

2. Створення початкової популяції.

3. Визначення та обчислення функції пристосованості.

4. Визначення пари для схрещування. Для вибору пари хромосом для схрещування використовується метод рулетки. Цей метод підвищує імовірність вибору більш пристосованих особин для подальшого еволюційного вдосконалення популяції.

5. Реалізація оператора схрещування. По точці розриву переставляємо ділянки генів між двома хромосомами.

6. Реалізація оператора мутації. За допомогою випадкового вибору точки на хромосомі змінюємо гени місцями.

7. Перевірка умови завершення процесу. Якщо умови завершення не виконані, повторюємо процес. Умовами можуть бути такими: досягнення заданої кількості поколінь або отримання заданого значення цільової функції (рис. 2).

Результати досліджень

Наша задача може бути сформульована як пошук оптимального значення складної цільової функції багатьох змінних. У цьому дослідженні використовується метод односточкового схрещування. Тоді популяція – набір груп $\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, хромосома – відповідає групі експертів $A_i = a_{i1}a_{i2} \dots a_{in}$, ген – відповідає одному з експертів a_{ij} . Потрібно сформувати найбільш кваліфікований склад експертної групи.

Для формування хромосом потрібно розрахувати значення генів. Як значення генів у нас буде оцінка відносної компетенції кожного експерта. Для розрахунку цієї оцінки використовуємо таку схему (рис. 3).

Оцінка проводиться на основі комплексного показника, який може бути отриманий шляхом 3 приватних оцінок:

1) визначаються показники, що характеризують ступінь розвитку професійних якостей експерта (П) та рівень кваліфікації (К), а також їх кількісні вимірювачі;

2) визначаються показники, що характеризують виконувану роботу, тобто дають можливість зіставити результати участі в експертизах (Р) з урахуванням рівня складності функцій, що виконуються ними (С);

3) визначаються показники, що характеризують ступінь розвитку особистих якостей (Л).

Комплексна оцінка (Д) визначається за такою формулою: $D = P * K + R * C + L$.

Оцінка всієї сукупності ознак проводиться шляхом підсумовування оцінок ознак, помножених на їхню середню значимість:

$$P = \sum_{i=1}^k b_i x_i. \quad (1)$$

Для визначення числа генів у хромосомі потрібно визначити оптимальну кількість експертів у групі. Достовірність оцінок групи експертів залежить від якостей окремих експертів та кількості членів експертизи. Зі збільшенням числа експертів достовірність оцінок зростає, але витрати пропорційні кількості експертів. Насправді чисельність експертної групи становить 5–7, максимум – 10–15 осіб.

Використовуючи алгоритм завдання лідера, відносний коефіцієнт компетентності t -го порядку для кожного експерта розраховують за формулою

$$K_i^t = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij} K_j^{t-1}}{\sum_{j=1}^n x_{ij} K_j^{t-1}}, \quad i=1,2,\dots,n. \quad (2)$$

Де n – кількість експертів у групі; x_{ij} – елементи матриці X ; t – номер порядку коефіцієнта компетентності.

Максимальне значення оцінки відносної компетенції експертів у нашому випадку – 73. Показник, сумарного значення компетенції групи дорівнює $73 * 9 = 657$. Це і є екстремум цільової функції. $F \rightarrow 657$.

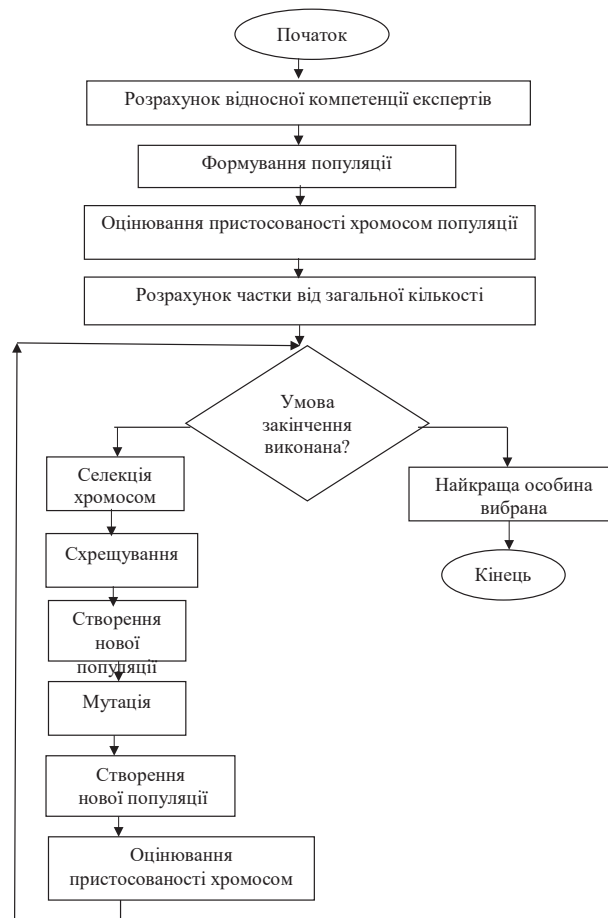


Рис. 2. Схема комбінації статистичних методів і генетичного алгоритму для формування експертних груп

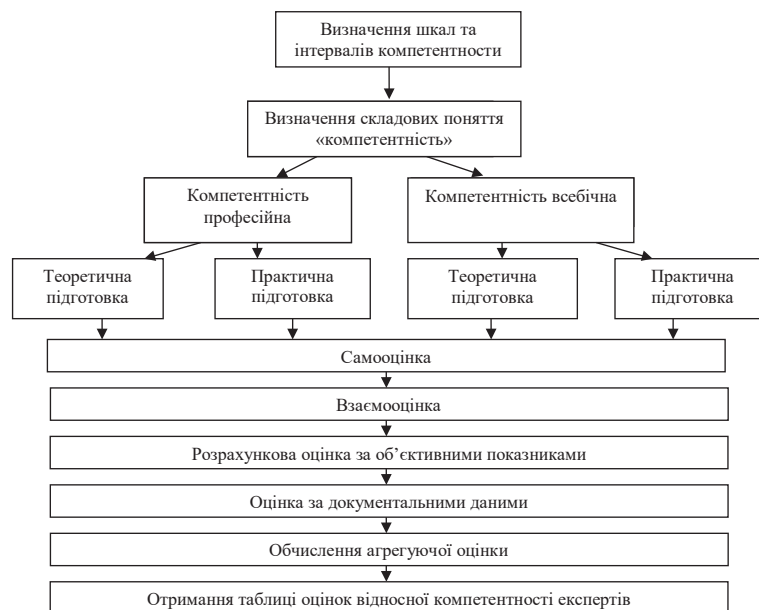


Рис. 3. Логіко-функціональна схема визначення оцінки відносної компетентності експертів

Табл. 1. Вихідна популяція

Набори популяції (групи експертів)	Хромосоми (з наборами генів)								
	1-ша група	35	41	27	23	29	48	42	37
2-га група	28	51	33	29	37	46	52	39	26
3-тя група	43	36	41	39	53	44	37	41	73
4-та група	52	27	34	46	51	49	33	42	62
5-та група	38	53	47	39	38	41	40	23	31
6-та група	44	26	47	29	34	36	53	55	21

Табл. 2. Розрахунок функції пристосованості

Набори популяції (групи експертів)	Функції пристосованості	Частка від загальної кількості %
1-ша група	313	14,5446 %
2-га група	341	15,8457 %
3-тя група	407	18,9126 %
4-та група	396	18,4015 %
5-та група	350	16,2639 %
6-та група	345	16,0316 %

З табл. 2 видно, що найбільш пристосованими є групи 3 і 4. Але «ідеального набору» серед представників популяції немає (умова закінчення алгоритму не виконана). Потрібно переходити до етапу селекції хромосом. І тому розраховується частка, яку вносить кожен набір у загальну пристосованість популяції (третя колонка табл. 2).

На основі отриманих часток формується модель «колеса рулетки». Процес відбору полягає у генерації випадкових чисел: кожне число потрапляє у певний

сектор, визначаючи конкретний набір хромосом, що візьме участь у подальшій репродукції.

Для здійснення схрещування виберемо окремі точки схрещування. Оскільки наборів 6, точок схрещування має бути 3. Схрещування передбачає обмін генами між наборами хромосом. Для здійснення схрещування випадково виберемо окремі точки схрещування (3, 6, 4 ген).

До схрещування: $A = a_1 a_2 a_k a_{k+1} \dots a_N$; $B = b_1 b_2 b_k b_{k+1} \dots b_N$;

Після схрещування: $A = a_1 a_2 a_k b_{k+1} \dots b_N$; $B = b_1 b_2 b_k a_{k+1} \dots a_N$.

Табл. 3. Точки схрещування

Групи експертів	Хромосоми 1-ї популяції								
	1-ша група	35	41	27	23	29	48	42	37
2-га група	28	51	33	29	37	46	52	39	26
3-тя група	43	36	41	39	53	44	37	41	73
4-та група	52	27	34	46	51	49	33	42	62
5-та група	38	53	47	39	38	41	40	23	31
6-та група	44	26	47	29	34	36	53	55	21

Табл. 4. Результат схрещування

Групи експертів	Хромосоми 2-ї популяції									Функції пристосованості
	1'-ша група	35	41	27	29	37	46	52	39	
2'-га група	28	51	33	23	29	48	42	37	31	322
3'-тя група	43	36	41	39	53	44	33	42	62	393
4'-та група	52	27	34	46	51	49	37	41	73	410
5'-та група	38	53	47	39	34	36	53	55	21	376
6'-та група	44	26	47	29	38	41	40	23	31	319

Виконаємо розрахунок функції пристосованості (цільову функцію). Як бачимо, 4'-та група збільшила значення функції пристосованості. Ітераційний процес дає змогу приблизитися до максимального значення функції пристосованості. Очевидно, що за невеликої довжини хромосоми (N порядку 10–20) можна виконати повний перебір за прийнятний час та знайти найкращі рішення. Як бачимо, у нашому випадку звичайне схрещування не дає можливості досягти цілі 657 без використання мутації або багаточислового схрещування, де ми вибираємо лише пікові значення.

Далі згідно зі схемою класичного ГА виконується оператор мутації [4; 6]. Мутація особливо потрібна для ГА з малим розміром популяції, тому що для них властива передчасна збіжність. Її суть у такому: у хромосомі довжиною N випадковим чином вибираються два гени (наприклад, на позиціях 2 та k). Після цього ці гени просто міняються місцями, а всі інші елементи залишаються незмінними. Сформувалася нова хромосома: $A = a_1 a_k a_3 \dots a_{k-1} a_2 \dots a_N$.

Продовжуючи експеримент, ми отримуємо рішення за менший час порівняно зі звичними методами. Отже, у багатьох випадках генетичні алгоритми виявляються більш ефективними, ніж традиційні алгоритми та методи. А розвиток комп'ютерних технологій і обчислювальної потужності комп'ютерів тільки зміцнить позиції генетичного алгоритму як ефективного алгоритму пошуку.

Обговорення результатів

Одним із завдань дослідження є обґрунтування того, що результати, отримані із застосуванням ГА, прискорюють одержання багатокритеріального оптимального рішення порівняно з класичними методами. Подібні висновки роблять автори в різних наукових роботах: В. О. Бабенко в роботі [1], Я. Пиріг у роботі [3] та ін. Порівняння результатів досліджень підкреслюють їх актуальність і доводять ефективність інтегрованого підходу. Головна відмінність нашої моделі – у цілісному поєднанні експертних, статистичних, математичних та оптимізаційних методів.

Висновки

У рамках дослідження розроблено комплексний метод багатокритеріальної оптимізації з використанням генетичних алгоритмів, за допомогою якого з'явилася можливість виконувати оптимальне формування експертної групи для виконання експертиз складних об'єктів.

Використання генетичної оптимізації відкриває нові можливості для створення інтелектуальних експертних технологій. Завдяки гнучкості механізмів пошуку ГА перевершують традиційні методи у швидкодії. Це робить їх незамінним інструментом для

розв'язання складних багатовимірних задач, де отримання достатньо точного результату за мінімальний проміжок часу є пріоритетним за вичерпний пошук максимуму.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно цього дослідження, у тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] В. О. Бабенко, О. К. Носовець, «Вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації з використанням генетичного алгоритму та методу аналізу ієрархій», Індуктивне моделювання складних систем, вип. 11, с. 19–28, 2019.
- [2] Т. Л. Будорацька, Н. М. Журавльова, «Використання генетичних алгоритмів для оптимізації структури інвестиційного портфеля цінних паперів», Економіка: реалії часу, № 1 (29), с. 26–33, 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://economics.opu.ua/files/archive/2017/No1/26.pdf>.
- [3] Я. Пиріг, М. Климаш, Ю. Пиріг, О. Лаврів, «Генетичний алгоритм як засіб розв'язання оптимізаційних задач», Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія, т. 3, № 2, с. 95–107, 2023. DOI: 10.23939/ictee2023.02.
- [4] S. M. Winkler, W. Banzhaf, T. Hu, and A. Lalejini, Genetic Programming Theory and Practice XXI. Springer Nature, 2025, 431 p.
- [5] W. Banzhaf, P. Machado, and M. Zhang, Handbook of Evolutionary Machine Learning. Springer, 2024, 485 p.
- [6] Y. Li, X. Yao, and W. Lin, “A comprehensive study of selection mechanism for genetic algorithms in dynamic environments,” Evolutionary Computation, vol. 31, no. 2, pp. 145–172, 2023.
- [7] K. Deb and D. Kalyanmoy, “Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms,” Journal of Optimization Theory and Applications, vol. 192, pp. 11–40, 2022.
- [8] G. C. Uribe, Optimization Algorithms: AI techniques for design, planning, and control problems. Manning Publications, 2024, pp. 89–118.
- [9] M. Gen and L. Lin, “Genetic algorithms and their applications,” in Springer Handbook of Engineering Statistics, 2012, pp. 635–674. DOI: 10.1007/978-1-4471-7503-2_33.
- [10] І. Н. Вдовиченко, «Інформаційні технології багатокритеріального експертного оцінювання альтернатив у соціальних системах», дис. канд. техн. Наук, Київ, 2008, 192 с.

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS FOR SOLVING MULTI-CRITERION CHOICE PROBLEMS IN FORMING THE COMPOSITION OF EXPERT GROUPS

Iryna Vdovychenko, Oksana Markova

The article is devoted to the solution of an urgent scientific and applied task – the development and substantiation of a combined method for forming expert groups, the operating algorithm of which integrates statistical approaches, mathematical modeling, expert assessment methods, and the apparatus of genetic algorithms. The paper substantiates the necessity of optimizing the expert selection process to minimize errors during the examination procedure.

A comprehensive scheme for forming the optimal composition of an expert group is proposed, based on a systematic combination of quantitative and qualitative indicators. Within the framework of the study, a complex optimization problem of multi-criteria selection of specialists for technical, social, and economic examinations is formalized. A scheme for combining statistical methods and a genetic algorithm in the formation of expert groups is presented. The mathematical model of the problem is based on maximizing a fitness function that considers a number of critical parameters: an individual expert competence index, a professional experience coefficient, and the degree of consistency of the candidate's previous assessments.

Particular attention is paid to the application of genetic algorithms for searching for optimal solutions in a large space of alternatives. The use of evolutionary mechanisms of selection, mutation, and crossover allows for the effective resolution of the multi-criteria selection problem, ensuring high precision in group formation. The results confirm that the synthesis of genetic algorithms with expert and mathematical methods significantly increases the reliability of forecasts and optimizes decision-making processes.

Keywords: *genetic algorithms, expertise, expert group, combined method, expert assessment, optimal solution, multi-criteria optimization, group composition, mathematical methods, statistical methods, chromosomes, gene, crossover, mutation, fitness function.*

REFERENCES

- [1] V. O. Babenko and O. K. Nosovets, "Solving a multi-criteria optimization problem using a genetic algorithm and the analytic hierarchy process," *Inductive Modeling of Complex Systems*, no. 11, pp. 19–28, 2019.
- [2] T. L. Budoratska and N. M. Zhuravlova, "The use of genetic algorithms for optimizing the structure of the investment portfolio of securities," *Economics: Realities of Time*, no. 1 (29), pp. 26–33, 2017. [Online]. Available: <http://economics.opu.ua/files/archive/2017/No1/26.pdf>.

- [3] Ya. Pyrih, M. Klymash, Yu. Pyrih, and O. Lavriv, "Genetic algorithm as a means of solving optimization problems," *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 95–107, 2023. DOI: 10.23939/ict2023.02.
- [4] S. M. Winkler, W. Banzhaf, T. Hu, and A. Lalejini, *Genetic Programming Theory and Practice XXI*. Springer Nature, 2025, 431 p.
- [5] W. Banzhaf, P. Machado, and M. Zhang, *Handbook of Evolutionary Machine Learning*. Springer, 2024, 485 p.
- [6] Y. Li, X. Yao, and W. Lin, "A comprehensive study of selection mechanism for genetic algorithms in dynamic environments," *Evolutionary Computation*, vol. 31, no. 2, pp. 145–172, 2023.
- [7] K. Deb and D. Kalyanmoy, "Multi-objective optimization using evolutionary algorithms," *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 192, pp. 11–40, 2022.
- [8] G. C. Uribe, *Optimization Algorithms: AI techniques for design, planning, and control problems*. Manning Publications, 2024, pp. 89–118.
- [9] M. Gen and L. Lin, "Genetic algorithms and their applications," in *Springer Handbook of Engineering Statistics*, 2012, pp. 635–674. DOI: 10.1007/978-1-4471-7503-2_33.
- [10] I. N. Vdovychenko, "Information technologies of multi-criteria expert evaluation of alternatives in social systems," Ph.D. dissertation, Kyiv, 2008, 192 p.

Дата першого надходження статті до видання:
03.02.2026

Дата прийняття статті до друку
після рецензування: 07.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті:
12.05.2026



Стаття поширюється
на умовах ліцензії відкритого
доступу CC BY 4.0