

С. В. ШЕВЧЕНКО

## КОНСТРУЮВАННЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИХ РІШЕНЬ ЗАДАЧ ВИБОРУ

Розглядається підхід до вирішення задач багатокритеріального вибору з визначенням доцільних претендентів на підставі значень ряду критеріїв. Відомі підходи до вирішення цих задач не завжди дозволяють визначати обґрунтовані рішення з повноцінним врахуванням особливостей обраних критеріїв та умов їх оцінювання. Порівняння оцінок по критеріям часто відбувається з суб'єктивних позицій без належних обґрунтувань, що позначається як на результатах вибору, так і на можливостях їх практичного застосування. Відомі процедури багатокритеріального вибору використовують фіксовані шкали вимірювання для порівняння значень, які в практичних ситуаціях можуть не відповідати реальним співвідношенням показників. Іншим суттєвим недоліком цих процедур є ігнорування наявності нелінійних залежностей між оцінками за критеріями та атрибутами рішень, що приймаються, у різних діапазонах їх значень. Перелічене свідчить про можливість отримання неадекватних оцінок рішень з відповідними негативними наслідками. В роботі пропонується підхід до конструювання рішень багатокритеріальних задач вибору на основі визначення претендентів шляхом упорядкування їх за ступенем наближення до варіанту з кращими співвідношеннями оцінок по обраним критеріям ефективності на основі ітеративних поступок за зазначеними критеріями. Порівняння претендентів відбувається на підставі співвідношень оцінок за узгодженими критеріями, визначення яких забезпечується сукупністю математичних моделей, що відтворюють залежності значень окремих критеріїв від атрибутів претендентів рішень. Формування послідовності претендентів рішень відбувається на основі результатів порівнянь за окремими критеріями, що дозволяє визначати альтернативні варіанти рішень та їх оцінки ефективності з побудовою підмножини Парето. Розглянуто приклад за відтворення процесу вибору альтернативних варіантів побудови віртуальної системи обробки даних на основі характеристик віртуальних машин від провайдерів технологій хмарної обробки. Отримані результати досліджень свідчать про можливість використання підходу, що пропонується, у складі підсистем підтримки прийняття рішень для вирішення задач оперативного управління динамічними процесами обслуговування та виробництва.

**Ключові слова:** задачі вибору, критерії, багатокритеріальний вибір, конструювання рішень, метод уступок, підсистеми прийняття рішень.

S. V. SHEVCHENKO

## CONSTRUCTION OF MULTI-CRITERIA SOLUTIONS TO SELECTION PROBLEMS

An approach to solving the problems of multi-criteria selection with the determination of suitable applicants based on the values of a number of criteria is considered. Known approaches to the solution of these problems do not always allow determining reasonable solutions with full consideration of the features of the selected criteria and their evaluation conditions. Comparison of evaluations by criteria often takes place from subjective positions without proper justification, which affects both the results of the selection and the possibilities of their practical application. Known multi-criteria selection procedures use fixed measurement scales to compare values, which in practical situations may not correspond to real ratios of indicators. Another significant shortcoming of these procedures is ignoring the presence of non-linear dependencies between evaluations by criteria and attributes of decisions made in different ranges of their values. The above indicates the possibility of obtaining inadequate evaluations of decisions with corresponding negative consequences. The paper proposes an approach to the construction of solutions to multi-criteria selection problems based on the definition of applicants by ordering them according to the degree of approximation to the option with the best ratios of evaluations according to the selected performance criteria based on iterative concessions according to the specified criteria. Applicants are compared on the basis of the ratios of assessments according to the agreed criteria, the definition of which is provided by a set of mathematical models that reproduce the dependence of the values of individual criteria on the attributes of the applicant decisions. The formation of a sequence of candidates for solutions is based on the results of comparisons according to individual criteria, which allows to determine alternative solutions and evaluate their effectiveness with the construction of a Pareto subset. An example is considered that reproduces the processes of choosing alternative options for building a virtual data processing system based on the characteristics of virtual machines from providers of cloud processing technologies. The obtained research results indicate the possibility of using the proposed approach as part of decision-making support subsystems to solve the problems of operational management of dynamic service and production processes.

**Keywords:** selection problems, criteria, multi-criteria selection, construction of decisions, method of concessions, decision-making subsystems.

**Вступ.** Задачі вибору – це задачі, вирішення яких призначене для багатокритеріального обґрунтування рішень, серед яких має бути обраним один або декілька доцільних варіантів. Для багаторазового вирішення таких задач можуть бути розроблені відповідні інформаційні технології в підсистемах підтримки прийняття рішень у різних предметних областях. При формуванні рішень використовується деяка ієрархія критеріїв якості претендентів вибору, притаманна предметній області претендентів, їх особливостям, використанню та обставинам, що склалися.

Вибір критеріїв покладається на особу, що приймає рішення, і, як правило, є суб'єктивним, враховуючи зовнішні та внутрішні чинники, що впливають на процес вибору.

Врахування ієрархії критеріїв дозволяє формалізувати процес оцінки претендентів.

Для обґрунтування рішень задачі багатокритеріального вибору, окремих аспектів підготовки та прийняття рішень запропоновано багато підходів, які базуються на інформації, що доступна на момент прийняття рішень. В основі зазначених підходів здебільшого використовується порівняння претендентів по рівню відповідності висунутих критеріям якості, які в свою чергу можуть бути формалізовані з різними ступенями визначеності, що відповідають прийнятному рівню достовірності, і дозволяють отримати дані для реалізації процесу вибору претендентів рішення в умовах обмежених ресурсів з урахуванням оцінок по обраним критеріям.

© С. В. Шевченко 2022



**Дослідницька стаття:** Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



Але при цьому передбачається наявність низки умов, які не завжди виконуються на практиці. Це, наприклад, сама можливість порівнянь оцінок, що відповідають якісно різним та несумісним предметним областям, припущення про існування лінійних співвідношень між діапазонами значень оцінок порівнянь та ін.

**Постановка задачі.** Умови отримання результатів вирішення задачі, що розглядається, містять наступне. Окремі варіанти вирішення задачі багатокритеріального вибору оцінюються з позицій ряду обраних локальних критеріїв ефективності і по отриманих результатах порівнянь повинні бути найкращими. Поняття найкращого рішення та процес його визначення мають бути повністю формалізованими. Використання зазначеного процесу повинне забезпечувати отримання обґрунтованих результатів. Наявність сукупності критеріїв, особливості їх визначення, а також, як правило, суперечливість потребують пошуку механізмів узгодження рішень та визначення компромісних варіантів підмножини Парето-оптимальних рішень.

В процесі порівняння претендентів вибору за окремими критеріями при визначенні рівня переваг за одними критеріями перед іншими та формуванні підсумкових оцінок ефективності, що покладені в основу існуючих підходів багатокритеріальних оцінок, виникає ряд об'єктивних перешкод, пов'язаних з неоднорідністю критеріїв, наявністю серед них нелінійних взаємозалежностей у різних діапазонах порівнянь, неузгодженістю значень, відсутністю обґрунтованих шкал вимірювання та оцінювання для порівняння значень оцінок за критеріями.

Гетерогенність та суперечливість сукупності критеріїв, що можуть застосуватися для оцінки ефективності рішень в окремих предметних областях, вимагає побудови обґрунтованих, прозорих та достовірних процедур їх порівняння з урахуванням чинників рівня важливості та прийнятної трудомісткості отримання результатів, особливо в умовах обчислень у реальному часі.

Перелічені умови та вимоги до вирішення задачі багатокритеріального вибору потребують розробки та застосування адекватних підходів до формування правил порівняння значень різномірних локальних критеріїв оцінки ефективності рішень з різними рівнями важливості, до формування інтегральних підсумкових оцінок ефективності претендентів вибору на підставі отриманих результатів порівнянь значень локальних критеріїв, до механізмів узгодження та пошуку збалансованих рішень, яким відповідають визначені претенденти вирішення задачі багатокритеріального вибору.

Відмічені процедури повинні бути реалізовані у складі інформаційних технологій, які дозволяють виконувати необхідні обчислення та досліджувати отримані результати.

Більшість процесів управління, особливо, в ринкових умовах, процесів проектування складних систем та технологій пов'язана з необхідністю вирішення задачі багатокритеріального вибору доцільних варіан-

тів серед доступної множини альтернативних претендентів. Саме тому вирішенню цих задач присвячено досить багато публікацій.

Серед них одним з відомих є метод аналізу ієрархій (MAI), запропонований Т. Сааті [1]–[3]. Метод дозволяє визначити пріоритети окремих альтернативних рішень, що розглядаються, спираючись на отримані експертні оцінки по сукупності обраних критеріїв ефективності. Для порівнянь використовується лінгвістична шкала, якій відповідають фіксовані вагові коефіцієнти. Маючи досить багато припущень, метод може доцільно використовуватися в обмежених умовах, не забезпечуючи повноцінне врахування всіх обставин та особливостей умов прийняття рішень. Незважаючи на це, простота застосування методу привела до досить поширеного його застосування [4]–[9].

Існує багато прикладів модифікації MAI, які направлені на усунення окремих недоліків методу або на врахування умов його застосування [7]–[9].

Ряд інших підходів ґрунтуються на використанні переваг вирішення задачі з одним критерієм змінюю представлення вихідної задачі внаслідок поєднання всіх критеріїв в один або визначенні серед них основного та переміщенні останніх у склад обмежень [10]–[11]. Такі підходи є доцільними, як правило, для окремих класів практичних задач з сумісними критеріями.

Для задач з суперечливими критеріями вирішення мають бути отримані на основі пошуку компромісних рішень, що досягаються шляхом прийняття деякої згоди на співвідношення між значеннями критеріїв, що порівнюються. Це найбільш поширений клас практичних задач і їх вирішенню присвячені роботи з побудовою підмножини Парето-оптимальних рішень та результатами додаткових досліджень особливостей умов прийняття рішень [12]–[13].

Одним з поширених підходів до формування Парето-оптимальної підмножини є використання методу поступок. Метод передбачає у ході пошуку компромісного рішення виконання поступок по оцінкам значень за окремими критеріями для послідовності рішень, що визначаються. Відомі застосування методу обмежені реалізаціями в заданих умовах.

Широке коло публікацій за даним напрямком досліджень свідчить про їх актуальність та про наявність не повністю вирішених питань.

Дана робота присвячена формуванню підходу, який дозволяє конструювати вирішення задачі багатокритеріального вибору в розглянутому колі питань.

**В роботі пропонується** підхід до вирішення задачі багатокритеріального вибору як послідовності визначень окремих локальних рішень у складі загального рішення, які підлягають подальшому ітераційному узгодженню з позицій вимог до використання ресурсів. Такий підхід дозволяє формувати рішення як композицію рішень, що побудовані на підставі порівнянь якості претендентів згідно оцінок значень обраних критеріїв ефективності, враховуючи їх важливість та обсяги ресурсів, необхідних для досягнення визначеного рівня оцінки ефективності.

Будемо вважати, що претенденти вибору можуть бути порівняні між собою за значеннями введених критеріїв ефективності, що складають множину  $F$

$$F = \{f_i\}, i \in I = \{1, 2, \dots, m\}.$$

Множину критеріїв  $F$ , що визначають доцільність обрання тих чи інших претендентів, та серед яких має бути обраний найкращий варіант, можна розділити на дві підмножини критеріїв  $F = F_1 \cup F_2$  з відповідним розподілом множини  $I = I_1 \cup I_2$ .

До підмножини  $F_1$  віднесемо критерії, які використовуються у ситуаціях відсутності повноцінної достовірної інформації відносно оцінок якості претендентів вибору, виявлення ряду чинників, що мають невизначений характер впливу на рівень оцінок, а також таких, що відображають суб'єктивні уподобання особи, яка приймає рішення. Прикладом критеріїв цієї групи можна вважати рейтинги претендентів вибору у різних умовах обрання, рейтинги представників та посередників, пов'язаних з походженням альтернативних варіантів, експертні оцінки зовнішніх умов, що впливають на вибір і використання претендентів.

Оцінки та обґрунтування претендентів вибору для цієї групи критеріїв можуть бути отримані аналогічно підходів, наведених у роботах [7]-[8]. Застосування критеріїв даної групи може суттєво обмежити сукупність варіантів вибору по більшості якісних характеристик претендентів, але не дозволяє повноцінно зіставити у порівняннях сукупності об'єктивних показників та можливостей претендентів. Тому для проведення повноцінного обґрунтування вибору доцільних варіантів склад критеріїв доповнюється критеріями підмножини  $F_2$ , використання яких розглядається у даній роботі.

Підмножина критеріїв  $F_2$  може бути визначена такими, що відображають суттєві атрибути, притаманні сукупності альтернативних варіантів, системні та синергетичні характеристики претендентів, особливості їх використання, фінансові та економічні характеристики.

Множина допустимих рішень задачі задається множиною  $D$ , яка містить сукупність претендентів вибору у вигляді векторів  $X_j$ ,  $j \in J = \{1, 2, \dots, n\}$ , кожен з яких повністю відповідає умовам вибору.

Компоненти векторів претендентів вирішення задачі  $X_j = \{x_{ij}\}$ ,  $j \in J$ , обмежені відповідними підмножинами  $G_i$ ,  $i \in I$ , елементи яких визначають допустимі значення атрибутів та характеристик.

Тоді множина допустимих рішень задачі може бути представлена наступним чином

$$D = \{X_1, X_2, \dots, X_n\} : X_j = \{x_{ij}\}, x_{ij} \in G_i, i \in I, j \in J.$$

Використання сукупності критеріїв ефективності для оцінки претендентів вибору дозволяє розробити процедуру побудови підмножини Парето-оптимальних рішень, серед елементів якої може бути обраний

претендент, і який на погляд ОПР найбільше відповідає вимогам обставин та ситуацій на момент прийняття рішення.

Застосування першої групи критеріїв дозволяє виділити підмножину  $D_0$ ,  $D_0 \subseteq D$ , яка обмежує сукупність варіантів вибору претендентів, що підлягають аналізу.

Підмножина  $D_0$  може бути визначена наступним чином

$$D_0 = \{X_j \in D : q_{ij} = f_i(X_j) \geq p_i, i \in I_1, j \in J\},$$

де  $P = \{p_i\}$  – вектор експертних оцінок допустимих значень обраних критеріїв ефективності претендентів вибору.

Використання другої групи критеріїв дозволяє побудувати процедуру визначення підмножини ефективних рішень  $D_f$ ,  $D_f \subset D_0 \subseteq D$ , елементи якої відповідають умовам Парето-оптимальних рішень для претендентів вибору.

Будемо вважати, що критерії ефективності мають оцінки рівня важливості  $\{r_i\}$ ,  $i \in I$ . Якщо провести упорядкування критеріїв у складі підмножини  $I_2 = \{1, 2, \dots, k\}$  по спаданню значень їх оцінок рівня важливості, то отримаємо підмножину  $I_2$

$$I_2 = \{i_1, i_2, \dots, i_k \in I_2 : r_{i_1} \geq r_{i_2} \geq \dots \geq r_{i_k}\}.$$

Використання підмножини  $I_2$  дозволяє виконувати обчислення, починаючи з оцінок для найбільш важливих критеріїв, що сприяє підвищенню адекватності результатів обчислень.

Пропонується обирати претендентів вирішення задачі багатокритеріального вибору у складі послідовності підмножин  $D_1, D_2, \dots, D_f$ , визначення яких забезпечує наступна процедура формування підмножини ефективних рішень претендентами з послідовним врахуванням значень оцінок локальних критеріїв зі спаданням важливості у наступній послідовності обчислень:

1. Нехай номер ітерації  $l = 1$ .
2. Визначимо

$$D = \left\{ X_i^* \in D_{l-1} : X_i^* = \arg \min_{X \in D_{l-1}} (\max) f_i(X), i \in I_2 \right\}.$$

3. Якщо  $|D| = 1$ , то  $X_l^* \in D$  є рішенням задачі.

4. Якщо  $|D| > 1$ , то визначимо  $D_l = D_{l-1} \setminus D$ .

5. Якщо  $|D_l| > 1$ , то вважаємо  $l = l + 1$  і повторюємо обчислення з пункту 2.

6. Якщо  $|D_l| = \emptyset$ , то маємо  $D_f = D_{l-1}$ .

В результаті проведення даних обчислень буде отримано або рішення, що відповідає компромісним значенням всіх критеріїв, або підмножина  $D_f$ , елементи якої не можуть бути поліпшені за значеннями обраних критеріїв ефективності.

Запропонована процедура є кінцевою в силу використання підмножин, визначених на підставі кінцевих множин  $D$  та  $I_2$ , елементи яких послідовно залучаються при виконанні обчислень, а також в наслідок послідовного обмеження підмножини рішень за рахунок вилучення претендентів з екстремальними значеннями локальних критеріїв ефективності.

Очевидно, що при відсутності даних щодо важливості критеріїв, зміст обчислень не змінюється.

Ітеративне застосування механізму поступок за рахунок вилучення чергових претендентів згідно отриманих їх визначень за поточними значеннями локальних критеріїв з підмножини  $I_2$ , призводить до вибору наступних претендентів, забезпечуючи пошук рішень серед таких їх представників, що мають краще поєднання значень обраних критеріїв.

При виборі нових претендентів буде спостерігатися погіршення оцінок, що були визначені для попередніх претендентів без змін загальних обсягів ресурсів або необхідність їх збільшення та можливого наступного перерозподілу. Такі співвідношення будуть свідчити про наближення чергових претендентів до тих, що відповідають умовам Парето-оптимальності [12].

Побудова та подальше застосування будь-яких систем потребує використання ресурсів, що визначаються обсягами та ринковою оцінкою вартості. Тому серед основних чинників, що впливають на рівень оцінок претендентів згідно значень критеріїв підмножини  $I_2$ , слід віднести частки обсягів спільних ресурсів, розподіл та перерозподіл яких створює можливість формування підмножини ефективних рішень  $D_f$ . Для врахування впливу цих чинників на процеси вибору необхідно побудувати математичні моделі, що відображують функціональні залежності оцінок значень локальних критеріїв ефективності від параметрів претендентів та виділених обсягів ресурсів.

Будемо вважати, що ці залежності відомі і мають наступний вигляд

$$q_{ij} = f_i(X_j), X_j \in D_j, i \in I, j \in J.$$

Проведення обчислень при визначенні рішень задач багатокритеріального вибору розглянемо на прикладі формування архітектури віртуальної системи обробки даних у середовищі хмарних обчислень.

Розглянемо особливості цих задач.

Актуальність застосування технологій хмарних обчислень обумовлена зростаючим переліком послуг та можливістю у поєднанні з привабливими економічними умовами процесів використання ресурсів віртуальних обчислювальних систем.

Ефективність таких рішень обумовлена визначенням вартості інформаційних послуг, технологій та ресурсів сучасних високопродуктивних комп'ютерних систем з встановленим програмним забезпеченням та обробки даних тільки за безпосередній час проведення обчислень або користування. Спостерігається наявність загальної тенденції збільшення частки безкоштовних тарифів.

Враховуючи потреби замовників виконання процедур обробки даних, можна обрати архітектуру віртуальної системи, яка найбільше відповідає вимогам обробки та обраним критеріям.

Серед критеріїв ефективності, що сприяють обґрунтуванню рішень при виборі архітектури віртуальних машин, слід розглянути вартість послуг обробки даних, вартість обсягів використання обчислювальних ресурсів віртуальної комп'ютерної системи, час обробки даних, готовність системи обробки до реалізації обчислень у момент звертання, надійність виконання обчислень, вартість обсягів і часу зберігання даних замовника та ін.

Враховуючи динамічність змін потреб у використанні технологій віртуальної обробки даних, високі показники готовності віртуальних обчислювальних засобів, їх ефективність та можливість оперативної варіації обсягами ресурсів, що використовуються під час обробки, перелік критеріїв до систем віртуальної обробки може бути обмежений врахуванням її вартості, продуктивності та часу виконання обчислень.

Попередній вибір бажаних варіантів архітектури від провайдерів може бути виконано з використанням нечіткої логіки. Детальний аналіз претендентів має бути проведений відповідно до вищенаведених положень.

Багатокритеріальний аналіз альтернатив вирішення задачі, що розглядається, складається в упорядкуванні елементів множини варіантів побудови архітектури системи обробки даних за обраними критеріями.

В цілому задача вибору провайдера хмарних обчислень з розподілом обсягів робіт обробки даних може бути представлена математичною моделлю дискретного програмування з векторним критерієм у наступній постановці.

Для відомих на момент часу  $t$  множини можливих станів  $\Omega$ , поточного стану системи  $S_i \in \Omega$ , вектору вхідних даних  $X_t$ , що потребують обробки, необхідно знайти значення вектору управління  $Y_t \in D$ , який забезпечує на момент часу  $\tau \geq t$  потрібну зміну стану системи  $S_i(t) \rightarrow S_k(\tau) \in \Omega$  з екстремальним значенням векторного критерію ефективності:

$$F(X_t, Y_t, S_k(t), S_k(\tau)) \rightarrow \text{extr}, \quad (1)$$

$$S_i(t) \rightarrow S_k(\tau), \tau \geq t, \quad (2)$$

$$S_i, S_k \in \Omega, Y_t \in D. \quad (3)$$

Врахування важливості окремих критеріїв надає можливість виконати пошук рішень задачі з формуванням послідовності претендентів, отримуючи оцінки для чергового варіанту архітектури за поточним критерієм та зменшуючи кількість альтернатив для наступного аналізу, видаляючи знайдене рішення з подальших розрахунків. Такий процес розрахунків набуває форму конструювання рішень у відповідності з обраними критеріями.

Формалізація співвідношень (1)–(3) для задачі вибору архітектури віртуальної системи обробки даних у хмарному середовищі дозволяє отримати математичні моделі, на основі яких можуть бути визначені рішення, що відповідають поставленим цілям і дозволяють отримати оцінки за обраними критеріями.

Для прикладу проведення розрахунків будемо користуватися умовними даними, що відображують співвідношення реальних об'єктів, значення яких розміщені на сайтах провайдерів хмарних послуг.

В табл. 1 представлені числові характеристики завдань, що потребують обробки з використанням обчислювальних ресурсів хмарних провайдерів.

В табл. 2 наведені дані, які стосуються вартості використання часу процесора, пристроїв оперативної пам'яті (ОП), підсистем введення/виведення (ПВВ) даних, ініціалізації виконання обробки, що пропонуються провайдерами.

З метою спрощення демонстрації змісту підходу до конструювання багатокритеріальних рішень при визначенні складу та характеристик сукупності віртуальних машин на підставі обчислення оцінок ефективності виконання процесів обробки даних завдань користувача була обрана математична модель у вигляді лінійної задачі оптимізації з мінімізацією вартості виконання завдань та урахуванням обмежень, що відзначають залежності між характеристиками завдань, параметрами віртуальних машин на підставі значень логічних змінних, введених для визначення розподілу завдань між віртуальними машинами згідно параметрів процесів обробки відповідно до моделей типу (1)–(3). Дані завдань характеризуються відомостями про умови їх виконання та містять загальні характеристики програмних модулів і обсягів даних, що використовуються при виконанні завдань на етапах введення даних, обробки та виведення результатів.

Динамічне забезпечення процесів необхідними обчислювальними ресурсами та управління їх виконанням покладається на модулі операційної системи (ОС), які також потребують цих ресурсів. Для оцінок процесів виконання завдань за критеріями необхідні відомості про технічні характеристики віртуальних машин від провайдерів.

Зміст інформації наведених таблиць залежить від обраних концепцій обчислень, типів математичних моделей задач визначення оцінок за критеріями ефективності при конструюванні рішень багатокритеріальних задач вибору.

Початкове формування сукупності віртуальних машин, серед яких можуть бути знайдені кращі альтернативи для виконання завдань, передбачає наявність інформації про технічні характеристики претендентів, що пропонуються провайдерами на підставі використання критеріїв першої групи.

Ці відомості дозволяють цілеспрямовано виконувати розрахунки потрібних обсягів використання обчислювальних ресурсів доступних підсистем та пристроїв у складі окремих віртуальних машин для виконання завдань з визначенням техніко-економічних показників обчислень, що можуть бути враховані при визначенні оцінок за поточними критеріями та сприяти вибору доцільних варіантів серед наданої сукупності.

Приклад відомостей про значення технічних параметрів та характеристик віртуальних машин, що розглядаються в роботі, наведені в табл. 3. В табл. 4 розміщена інформація про продуктивність віртуальних машин, час приведення до готовності, умови використання прикладного програмного забезпечення (ПЗ), ОС та підсистем введення-виведення даних (ПВВ). Для вирішення задачі розподілу завдань був застосований пакет What'sBest [14].

Таблиця 1 – Характеристики завдань

Характеристики	Програмні модулі						
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Кількість операцій, *E+06	30	300	250	522	40	110	1000
Обсяг потрібної оперативної пам'яті, МБ	250	2000	1000	450	330	250	1200
Час ініціалізації, с	5,0	2,5	3	1,2	2,5	2,0	2,5
Пріоритет	1	2	3	4	5	6	7
Інтенсивність введення/виведення, оп./с	20	300	300	510	2	3	12000
Обсяг даних введення/виведення, МБ	5	11	30	25	15	28	30
Час вирішення, с	10	5	28	12	30	40	25

Таблиця 2 – Вартість користування ресурсами віртуальних комп'ютерів хмарних провайдерів

Віртуальні машини	Вартість користування процесором, \$/с	Вартість користування пристроями ОП, \$(МБ*с)	Вартість користування ПВВ, \$(МБ*с)	Вартість ініціалізації, \$	Початковий стан
VM1	40,00	0,12	200	1200	0
VM2	28,80	0,20	300	1500	0
VM3	24,00	0,14	300	1300	0
VM4	40,00	0,16	500	2000	0

Таблиця 3 – Обрані характеристики віртуальних машин

Віртуальні машини	Тип процесора	Кількість процесорів	Кількість ядер процесора	Обсяг оперативної пам'яті, GB	Частота синхронізації, GHz
VM1	Type 1	1	10	10	7,00
VM2	Type 2	2	1	20	4,00
VM3	Type 3	1	20	40	5,40
VM4	Type 4	2	40	40	6,00

Таблиця 4 – Характеристики віртуальних машин від хмарних провайдерів

Віртуальні машини	Середня продуктивність, оп./с	Час до готовності, с	Пропускна здатність ПБВ, МВ/с*Е+03	Частка оперативної пам'яті ПЗ	Частка продуктивності процесора для ОС
VM1	22857143	10	200	0,2	0,2
VM2	80000000	12	170	0,4	0,4
VM3	25925926	15	220	0,3	0,3
VM4	53333333	20	250	0,4	0,4

Результати вирішення задачі наведені в табл. 5. Згідно даних табл. 5 всі завдання розподілені для виконання між віртуальними машинами, для яких визначена їх ініціалізація.

На основі отриманих результатів були визначені оцінки за зазначеними критеріями: загальна продуктивність системи обробки даних при виконанні завдань, рівень завантаженості ресурсів та час виконання завдань. Обчислювальні ресурси другої машини не використовуються, що пояснюється вартістю її ініціалізації та вартістю процесорного часу, які у порівнянні вихідних значень вищі, ніж у інших машини.

Результати вирішення задачі управління розподілом та обробкою даних завдань можуть бути використані для наступного аналізу залежностей оцінок за критеріями від характеристик процесів виконання та параметрів складових підсистем.

При визначенні доцільних варіантів віртуальних машин, що мають виконувати процеси обробки завдань, можна виділити наявність спільних чинників для сукупності альтернатив, рівень значень яких суттєво впливає на оцінки обраних критеріїв. Насамперед, це стосується часток спільних ресурсів, які виділяються для забезпечення значень оцінок окремих критеріїв.

При цьому для визначення збалансованих рішень за обраними критеріями необхідно проводити розрахунки розподілу часток спільних ресурсів з метою пошуку доцільного рівня поступок за критеріями, який

є прийнятним для замовника і відповідає умовам придбання необхідних ресурсів у визначених обсягах та термінах постачання або виконувати вибір таких їх значень, що забезпечують і розподіл ресурсів, і визначають безпосередньо значення оцінок окремих критеріїв.

Для задачі вибору віртуальних машин, що розглядається як приклад конструювання багатокритеріальних рішень, ключовим параметром разом з рівнем управління виконанням програмних кодів слід вважати таку характеристику центрального процесора як кількість вбудованих ядер, що разом з частотою синхронізації визначають і загальну продуктивність виконання, і час виконання, і вартості розрахунків та системи обчислень в цілому.

Оцінки за вказаними критеріями дозволили побудувати залежності їх значень від кількості ядер у складі процесора, які можуть виконувати незалежну обробку програмного коду. Ці залежності можуть застосовуватися для визначення ступеню впливу параметрів системи на оцінки критеріїв ефективності, що дозволяє визначати доцільний рівень поступок у ході конструювання багатокритеріальних рішень задач вибору.

Аналіз співвідношень на рис.1 свідчать про суттєву залежність часу обчислень від продуктивності обраних віртуальних машин з різною кількістю ядер з відповідною їх вартістю, а також значно меншу залежність вартості обчислень від вищевказаних чинників, враховуючи використання на різних етапах

Таблиця 5 – Розподіл програмних модулів та ініціалізація

Віртуальні машини	Програмні модулі							Ініціалізація
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	
VM1	0	0	0	1	1	0	0	1
VM2	0	0	0	0	0	0	0	0
VM3	1	1	0	0	0	0	0	1
VM4	0	0	1	0	0	1	1	1

обробки даних завдань інших пристроїв та обчислювальних ресурсів, підсистем комунікацій з фіксованими тарифами, прийнятими провайдерами хмарних послуг.

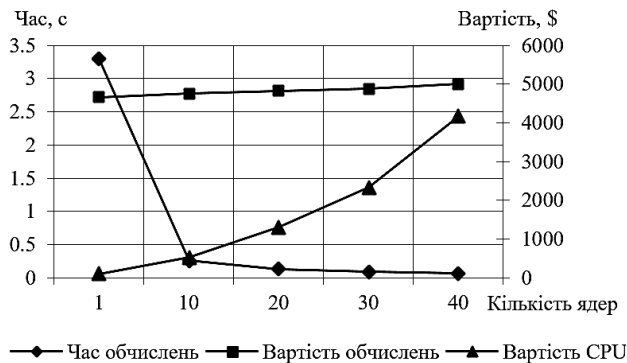


Рис. 1. Залежності часу і вартості обчислень від характеристик процесора

Це пояснюється також співвідношеннями між загальною продуктивністю та рівнем утилізації ресурсів центрального процесора (CPU) віртуальних машин в результаті виконання обчислень з різною кількістю ядер у складі процесора, що показані на рис. 2.

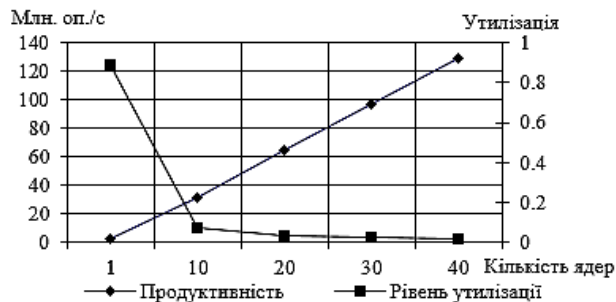


Рис. 2. Продуктивність та рівень утилізації

Ці залежності свідчать, що висока продуктивність віртуальних машин при виконанні поточних завдань супроводжується невисоким рівнем утилізації продуктивності віртуальних машин відносно номінальних значень.

З іншого боку такі співвідношення створюють умови для підтримки високого рівня готовності машин до початку виконання обчислень

**Висновки.** Задачі багатокритеріального вибору з визначенням доцільних варіантів претендентів складають поширений клас задач, вирішенню яких присвячено досить багато досліджень. Існуючі підходи до вирішення цих задач не завжди дозволяють визначити обґрунтовані збалансовані рішення з повноцінним урахуванням особливостей предметної області, обраних критеріїв та умов їх оцінювання. Порівняння оцінок по критеріям часто відбувається з суб'єктивних позицій без належних обґрунтувань, що позначається як на результатах вибору, так і на можливостях їх практичного застосування. Відомі процедури багатокритеріального вибору, такі, як метод аналізу ієрархій, використовують фіксовані шкали вимірювання для

порівняння значень, що в практичних ситуаціях можуть не відповідати реальним співвідношенням показників. Іншим суттєвим недоліком таких процедур є відсутність врахування наявності нелінійних залежностей у складі співвідношень між оцінками за критеріями та атрибутами рішень у різних діапазонах їх значень. Це може приводити до отримання неадекватних оцінок рішень з відповідними негативними наслідками.

Пропонується виконувати конструювання рішень багатокритеріальних задач вибору на основі упорядкування претендентів шляхом ітеративних поступок за обраними критеріями ефективності. В результаті упорядкування претендентів рішень відбувається формування Парето-оптимальної підмножини на підставі визначення кращих співвідношень оцінок за узгодженими критеріями.

Для визначення окремих оцінок рішень, що приймаються, використовується сукупність математичних моделей, які дозволяють побудувати залежності значень критеріїв від атрибутів претендентів рішень. Формування послідовності претендентів рішень відбувається на основі результатів порівнянь за окремими критеріями з визначенням альтернативних варіантів рішень та їх оцінок ефективності.

Розглянутий приклад багатокритеріального вибору доцільних варіантів побудови віртуальної системи обробки даних на основі характеристик віртуальних машин від провайдерів технологій хмарної обробки даних свідчить про можливість застосування підходу, що пропонується, у складі підсистем підтримки прийняття рішень для вирішення задач оперативного управління динамічними процесами обслуговування та виробництва.

#### Список літератури

1. Saaty T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*. 1977. Vol. 15, № 3. P. 234–281.
2. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*. Vol. 1. № 1. 2008. P. 83–98.
3. Saaty T. L., Shang J. An innovative orders-of-magnitude approach to AHP-based multi-criteria decision making: Prioritizing divergent intangible humane acts. *European Journal of Operational Research*. 2011. Vol. 214, № 3. P. 703–715.
4. Варталян В. М., Штейнбрехер Д. О. Застосування методу аналізу ієрархій для побудови стратегії управління знаннями високотехнологічних проектів. *Радіоелектроніка і комп'ютерні системи*. 2019. № 2 (90). С. 118–126.
5. Данілова І. С., Букреев В. Ю. Застосування методу аналізу ієрархій для прийняття управлінських рішень в зовнішньоекономічній діяльності. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2018. Вип. 6 (17). С. 167–172.
6. Іпполітова І. Я., Сорокотяченко К. С. Використання методу аналізу ієрархій під час реалізації стратегії енергозбереження. *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2016. Вип. 14. С. 370–376.
7. Ayhana M. B. Fuzzy AHP Approach for supplier selection problem: a case study in a gearmotor company. *International Journal of Managing Value and Supply Chains (IJMVSC)*. 2013. Vol. 4, № 3. P. 11–23.
8. Solangi Y. A. Assessing and overcoming the renewable energy barriers for sustainable development in Pakistan: An integrated AHP and fuzzy TOPSIS approach. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 173. P. 209–222.

9. Zhang H. The Analysis of the Reasonable Structure of Water Conservancy Investment of Capital Construction in China by AHP Method. *Water Resources Management*. 2009. Vol. 23. P. 1–18.
10. Кандиба І. О. Багатокритеріальний вибір кращого сценарію вступної кампанії закладу вищої освіти. *Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація*. 2021. Том 32 (71), № 4. С. 71–77.
11. Івченко Р. А., Купін А. І. Дослідження методів багатокритеріальної оптимізації для вибору обладнання або деталей на виробництві. *Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація*. 2021. Том 32 (71), ч. 1, № 1. С. 67–72.
12. Podinovski V. V. Potential optimality in multicriterial optimization. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2014. Vol. 54. P. 429–438.
13. Nelyubin A. P., Podinovski V. V. Multicriteria choice based on criteria importance methods with uncertain preference information. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2017. Vol. 57. P. 1475–1483.
14. *LINDO® Software for Integer Programming, Linear Programming, Nonlinear Programming, Stochastic Programming, Global Optimization*. URL: <https://www.lindo.com/> (дата звернення: 15.05.2022).
5. Saaty T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*. 1977, vol. 15, no 3, pp. 234–281.
2. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*. 2008, vol. 1, no 1, pp. 83–98.
3. Saaty T. L., Shang J. An innovative orders-of-magnitude approach to AHP-based multi-criteria decision making: Prioritizing divergent intangible humane acts. *European Journal of Operational Research*. 2011, vol. 214, no. 3, pp. 703–715.
4. Vartanian V. M., Shteinbrekher D. O. Zastosuvannya metodu analizu iierarkhii dlia pobudovy stratehii upravlinnia znanniamy vysokotekhnolohichnykh proektiv [Application of the hierarchy analysis method for building a knowledge management strategy for high-tech projects]. *Radioelektronni i kompiuterni systemy* [Radioelectronic and computer systems]. 2019, no. 2(90), pp. 118–126.
5. Danilova I. S., Bukrieiev V. Iu. Zastosuvannya metodu analizu iierarkhii dlia pryiniattia upravlinskykh rishen v zovnishnoekonomichnii diialnosti [Application of the method of analysis of hierarchies for making management decisions in foreign economic activities]. *Skhidna Yevropa: ekonomika, biznes ta upravlinnia* [Eastern Europe: Economy, Business and Management]. 2018, is. 6 (17), pp. 167–172.
6. Ippolitova I. Ia., Sorokotiazhenko K. S. Vykorystannia metodu analizu iierarkhii pid chas realizatsii stratehii enerhozberezhennia [Using the method of analyzing hierarchies during the implementation of the energy saving strategy]. *Hlobalni ta natsionalni problemy ekonomiky* [Hlobalni ta natsionalni problemy ekonomiky]. 2016, is. 14, pp. 370–376.
7. Ayhana M. B. Fuzzy AHP Approach for supplier selection problem: a case study in a gearmotor company. *International Journal of Managing Value and Supply Chains (IJMVSC)*. 2013, vol. 4, no. 3, pp. 11–23.
8. Solangi Y. A. Assessing and overcoming the renewable energy barriers for sustainable development in Pakistan: An integrated AHP and fuzzy TOPSIS approach. *Renewable Energy*. 2021, vol. 173, pp. 209–222.
9. Zhang H. The Analysis of the Reasonable Structure of Water Conservancy Investment of Capital Construction in China by AHP Method. *Water Resources Management*. 2009, vol. 23, pp. 1–18.
10. Kandyba I. O. Bahatokryterialnyi vybir krashchoho stsenariiu vstupnoi kampanii zakladu vyshchoi osvity [Multi-criteria selection of the best scenario for the entrance campaign of a higher education institution]. *Informatyka, obchysliuvalna tekhnika ta avtomatyzatsiia* [Informatics, computing and automation]. 2021, vol. 32(71), no. 4, pp. 71–77.
11. Ivchenko R. A., Kupin A. I. Doslidzhennia metodiv bahatokryterialnoi optymizatsii dlia vyboru obladdannia abo detalei na vyrobnytstvi [Study of multi-criteria optimization methods for selecting equipment or parts in production.]. *Informatyka, obchysliuvalna tekhnika ta avtomatyzatsiia* [Informatics, computing and automation]. 2021, vol. 32 (71), part. 1, no. 1, pp. 67–72.
12. Podinovski V. V. Potential optimality in multicriterial optimization. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2014, vol. 54, pp. 429–438.
13. Nelyubin A. P., Podinovski V. V. Multicriteria choice based on criteria importance methods with uncertain preference information. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2017, vol. 57, pp. 1475–1483.
14. *LINDO® Software for Integer Programming, Linear Programming, Nonlinear Programming, Stochastic Programming, Global Optimization*. Available at: <https://www.lindo.com/> (accessed: 15.05.2022).

#### References (transliterated)

Надійшла (received) 21.10.2022

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Шевченко Сергій Васильович** – кандидат технічних наук, професор НТУ «ХПІ», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3831-5425>; e-mail: [serhii.shevchenko@khi.edu.ua](mailto:serhii.shevchenko@khi.edu.ua)

**Shevchenko Sergiy Vasyliovych** – Candidate of Technical Sciences (PhD), Professor of NTU "KhPI", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Software Engineering and Intelligent Technology Management; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3831-5425>; e-mail: [serhii.shevchenko@khi.edu.ua](mailto:serhii.shevchenko@khi.edu.ua)