

## МОДИФІКАЦІЯ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ ДЛЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

**Bondarenko V.Ye. A modification of the method of analytic hierarchy process for decision making in complex systems.** The article is devoted to the development of decision support systems. The main method that is used to build the decision support system was chosen as the method of the analytic hierarchy process which was developed by Thomas L. Saaty. This method was modified in the direction of building a coherent matrix of pairwise comparisons. The paper proposes an approach to the evaluation of a pairwise comparison of the indicators with the help of a experts group that helped make the evaluation more accurate, also presents an approach to assessing the consistency of pairwise comparisons matrix based on the analysis of transitivity of the graph which is constructed with the help of the matrix of pairwise comparisons.

Based on the developed modification of the analytic hierarchy process was built the software system which is implemented in C++ for decision support. One of the areas of the system application is the analysis of decision making problems in the field of public procurement.

The article describes the example of using of the decision support system for decision making in the field of public procurement to assess the companies bidders for the construction of an industrial facility.

**Keywords:** decision making, decision support systems, government procurement

**Бондаренко В.Є. Модифікація методу аналізу ієрархій для прийняття рішень у складних системах.** Розглянуто принцип роботи систем підтримки прийняття рішень на основі методу аналізу ієрархій, який у роботі модифікований методом узгодження матриці попарних порівнянь, а також підходом до групової експертної оцінки попарних порівнянь, що підвищує якість методу аналізу ієрархій. Описано процес розробки програмної системи прийняття рішень на мові C++.

З метою дослідження роботи системи, проведено аналіз роботи системи підтримки прийняття рішень на прикладі прийняття рішень у сфері державних закупівель для оцінки підприємств учасників тендерів, що містять значну кількість аналізованих показників.

**Ключові слова:** прийняття рішень, системи підтримки прийняття рішень, державні закупівлі

**Бондаренко В.Е. Модификация метода анализа иерархий для принятия решений в сложных системах.** Рассмотрен принцип работы систем поддержки принятия решений на основе метода анализа иерархий, который в работе модифицируется методом согласования матрицы попарных сравнений, а также подходом к групповой экспертной оценке парных сравнений, что повышает качество метода анализа иерархий. Описан процесс разработки программной системы принятия решений на языке C++.

С целью исследования работы системы, проведен анализ работы системы поддержки принятия решений на примере принятия решений в сфере государственных закупок для оценки предприятий участников тендеров, содержащих значительное количество анализируемых показателей.

**Ключевые слова:** принятием решений, системы поддержки принятия решений, государственные закупки

### Вступ

Розвиток інформаційних технологій дедалі більше впливає на повсякденне життя людей. В наш час важко знайти галузь, де не застосовуються комп'ютерні технології. Основними сферами широкого застосування обчислювальної техніки стали: наука, промислова індустрія, сфера банківських послуг, побутове застосування і т.д. Також незмінно йде процес розвитку і створення різних інформаційних напрямків і технологій, які підтримують ці сфери людської діяльності. Одним з таких напрямків є розробка систем підтримки прийняття рішень, метою яких є допомога суспільству в процесі вирішення складних задач, що пов'язані з різними сферами його діяльності. Тому наукові роботи, що виконуються у цьому напрямку є надзвичайно актуальні.

Розробка систем підтримки прийняття рішень має базуватися на методах, за допомогою яких буде проводитися оцінювання необхідних об'єктів. Одним з найбільш популярних методів є метод аналізу ієрархій [1], який надзвичайно часто використовується для розробки систем підтримки прийняття рішень.

Однак використання методу аналізу ієрархій зустрічає ряд складностей [2], які утруднюють його використання. Одним з суттєвих недоліків методу є можлива неузгодженість матриці парних порівнянь, яка зумовлюється не адекватними оцінками експертів показників і об'єктів, що аналізуються.

Причому Сааті рекомендує при погано узгодженій матриці або змінити експертів, або знайти додаткові дані, або вирішувати проблему іншим методом.

Виходячи з вищевикладеного, метою роботи є модифікація методу аналізу ієрархій, яка дозволяє виконувати попарні порівняння групою експертів, що має підвищити якість такого порівняння, а також перевірки узгодженості матриці парних порівнянь.

### 1. Групова експертна оцінка попарного порівняння показників

З метою покращення побудови матриці попарних порівнянь, доцільно для такого порівняння використовувати групу експертів. Методика такого використання розроблена автором і наведена нижче.

Оцінку  $i$ -го показника відносно  $j$ -го показника  $a_{ij}$  про попарному їх порівнянні виконує група з  $m$  експертів за наведеним нижче алгоритмом [3] з можливим використанням  $T$  етапів оцінювання з метою підвищення його якості.

#### Алгоритм 1.

1. Оцінка  $a_{ij}$  обчислюється як зважене середнє за такою формулою

$$a_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m \rho_k S_{ij}^k}{\sum_{k=1}^m \rho_k},$$

де  $\rho_k$  - коефіцієнт довіри до  $k$ -го експерта (на першому етапі оцінювання коефіцієнти довіри до усіх експертів однакові і дорівнюють 1),  $S_{ij}^k$  - оцінка  $i$ -го показника відносно  $j$ -го показника, що визначена  $k$ -им експертом,  $m$  - кількість експертів.

Оцінка  $S_{ij}^k$  показників знаходяться кожним експертом на основі шкали важливості, значення якої визначаються у межах від 1 до 9.

2. Коригується коефіцієнт довіри до  $k$ -го експерта за такою формулою

$$\rho_k = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \rho_k^t,$$

де  $T$  - кількість етапів оцінювання,  $\rho_k^t$  - коефіцієнт довіри до  $k$ -го експерта на  $t$ -му етапі

оцінювання;  $\rho_k^t = \exp\left(-\frac{(G_{ij} - S_{ij}^k)^2}{2\sigma_k}\right)$ ;  $G_{ij}$  - апостеріорна оцінка  $i$ -го показника відносно  $j$ -го

показника (тобто оцінка, яка визначена в процесі перевірки матриці попарних порівнянь на неузгодженість);  $\sigma_k$  - коефіцієнт забування  $k$ -го експерта.

3. Пункти 1-2 повторюються доти, доки зміна оцінок, матриці попарних порівнянь, зумовлена перевіркою на неузгодженість, не буде менша за задану величину  $\varepsilon$ .

### 2. Узгодження матриці попарних порівнянь

Виходячи з методу аналізу ієрархій [1], будується матриця показників, у якій кожен рядок і стовпець помічені показниками. Матриця заповнюється оцінкою порівняння двох

показників, якими помічені рядок і стовпець. Оцінка виконується на основі шкали важливості, яка має значення від 1 – «Рівна перевага» до 9 - «Дуже значна перевага».

Виконується попарне порівняння показників, наприклад, що більш суттєво для замовника місце розташування підприємства чи прибуток від реалізації його продукції? Якщо прибуток має дуже значну перевагу (оцінка по шкалі важливості - 9), то на перетині рядка поміченого показником “прибуток” і стовпця поміченого показником “місце” ставиться оцінка 9, а на перетині стовпця поміченого показником “прибуток” і рядка поміченого показником “місце” ставиться оцінка 1/9. Таким чином, групою експертів формується матриця попарних порівнянь показників, приклад якої наведено у табл.1.

Табл. 1. Неузгоджена матриця попарних порівнянь

	Місце розташування	Прибуток	Капітал	Основні фонди
Місце розташування	1	3	5	8
Прибуток	1/3	1	1/3	6
Капітал	1/5	3	1	9
Основні фонди	1/8	1/6	1/9	1

В процесі побудови такої матриці попарних порівнянь, вона має бути узгодженою, тобто має виконуватися транзитивність заданих матрицею відношень.

Транзитивність дозволяє перевірити логіку мислення експерта. Якщо експерт вважає, що фактор А перевершує фактор В, а фактор В, в свою чергу, перевершує фактор С, то при парному порівнянні фактор А повинен перевершувати фактор С, тобто має виконуватися нерівність  $A > B > C$ , де символ «>» означає перевершує.

Крім того, мають виконуватися і числові оцінки транзитивності відношень. Так, наприклад, якщо фактор А перевершує фактор В в 2 рази, а фактор В, в свою чергу, перевершує фактор С в 3 рази, то фактор А повинен перевершувати фактор С в  $m=2 \times 3=6$  разів.

Відсутність узгодженості може бути серйозним обмежуючим фактором для використання методу.

Для дослідження транзитивності відношень у матриці попарних порівнянь, у роботі пропонується використовувати орієнтовані графи.

Одне з перших питань, що виникають при вивченні графів, це питання про існування шляхів між парами вершин. Відповіддю на питання - введене вище відношення досяжності на вершинах графа  $G = (V, E)$ , де  $V$ - множина вершин,  $E$  – множина зв'язків (відношень) між вершинами графу.

Вершина  $w \in V$  досяжна з вершини  $v \in V$ , якщо  $v = w$ , або в  $G$  є шлях з  $v$  в  $w$ . Інакше кажучи, відношення досяжності є рефлексивним і транзитивним замиканням відношення  $E$ .

Для аналізу узгоджень матриці попарних порівнянь, побудуємо граф використовуючи матрицю узгоджень, як матрицю суміжностей графа, де значення елемента матриці будемо трактувати, як вагу ребра графа.

Оскільки матриця попарних порівнянь будується таким чином, що  $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$ , де  $a_{ij}$  – елемент матриці попарних порівнянь, то для побудови графа можливо не використовувати ті відношення, для яких  $a_{ij} < 1$  при  $i \neq j$ , а також  $a_{ii} = 1$ .

Матриця наведена у табл.1. попарно порівнює деякі показники, що характеризують підприємства. Використовуючи матрицю табл.1., як матрицю суміжностей графа, будуємо граф для аналізу неузгодженостей (рис. 1). Для спрощення зображення, гілки вага яких менше або дорівнює 1 не відображалися на графі.

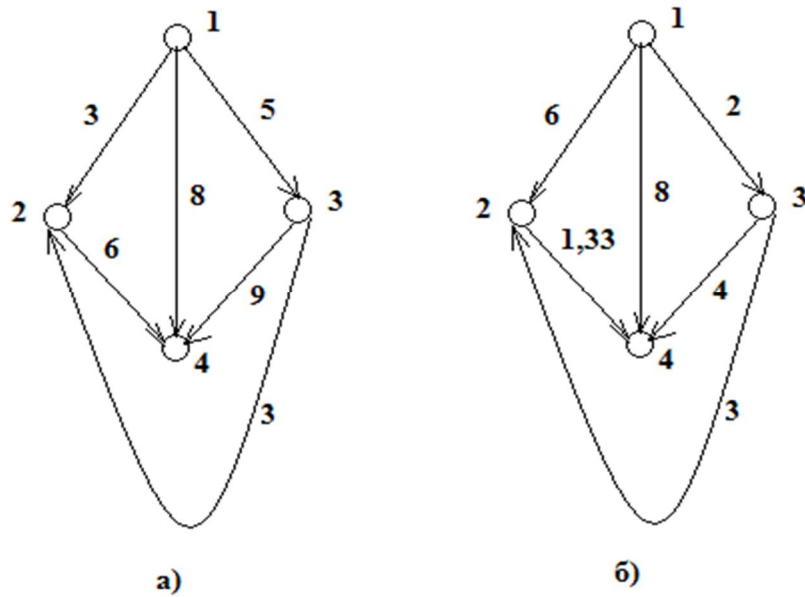


Рис. 1. Граф для аналізу неузгодженостей. а) – неузгоджена матриця попарних порівнянь, б) – узгоджена матриця попарних порівнянь.

З аналізу графа рис.1,а видно, що матриця попарних порівнянь (табл.1) неузгоджена оскільки шлях 1-2-4 має вагу 18, а шлях 1-4 тільки 8. Шлях 1-3-2 має вагу 15, а шлях 1-2 тільки 3. Шлях 1-3-4 має вагу 45, а шлях 1-4 тільки 8.

На рис.1,б наведено граф, побудований на основі роботи експертів по узгодженню матриці попарних порівнянь. Така узгоджена матриця наведена у табл. 2.

Табл. 2. Узгоджена матриця попарних порівнянь

	Місце розташування	Прибуток	Капітал	Основні фонди
Місце розташування	1	6	2	8
Прибуток	1/6	1	1/3	1,33
Капітал	1/2	3	1	4
Основні фонди	1/8	1/1,33	1/4	1

Узгодження матриці попарних порівнянь виконується групою експертів у ітеративному режимі.

### 3. Алгоритм і програмна реалізація системи підтримки прийняття рішень

Програмна реалізація даного методу виконана на мові програмування C++ в системі програмування C++ Builder.

Процес роботи з системою можна розділити на такі етапи:

1. Користувач створює список показників і проводить їх попарне порівняння на основі групової оцінки експертів.
2. Далі виконується узгодження матриці попарних порівнянь показників на основі групової оцінки експертів.
3. Другий етап передбачає створення списку об'єктів і проведення їх попарного порівняння по кожному з показників на основі алгоритму аналізу ієрархій Сааті [1].
4. Далі виконується узгодження матриць попарних порівнянь об'єктів на основі групової оцінки експертів по кожному з показників.

5. На останньому етапі проводяться розрахунки рейтингу об'єктів, виконаному на основі групи показників.

#### 4. Тендер на виконання будівельно-монтажних робіт на об'єкті «Компресорна станція»

Для ілюстрації роботи методу прийняття рішень і побудованої на його основі програмної системи, була вибрана сфера державних закупівель, яка регламентується законом України «Про здійснення державних закупівель» [4].

Розглядався тендер на виконання будівельно-монтажних робіт на об'єкті «Компресорна станція».

Для оцінки підприємств учасників даного тендера існують вісім показників. Ці показники представлено в табл. 3. Для зручності роботи, кожному показнику присвоєна скорочена назва.

У табл. 4. наведено список підприємств, що приймають участь у тендері.

Табл. 3. Показники і їх аббревіатура

№ п.п.	Назва показника	Аббревіатура
1	Досвід виконання робіт, аналогічних предмету закупівлі.	ДВР
2	Склад і кваліфікація персоналу Учасника тендеру.	СКП
3	Матеріально-технічне забезпечення Учасника тендеру.	МТЗ
4	Рівень організації будівельно-монтажних робіт.	РОР
5	Оцінка виконання вимог Замовника щодо своєчасного введення об'єктів.	ОВВ
6	Організація виконання спеціальних робіт і порядок залучення субпідрядних організацій.	ОВР
7	Облік всього обсягу робіт відповідно до вимог документації.	ООР
8	Рівень контролю якості робіт, застосовуваний Учасником.	РКЯ

Табл. 4. Підприємства і їх аббревіатура

№ п.п.	Назва підприємства	Аббревіатура
1	ТОВ «Проммонтаж»	ПРО
2	ТОВ «Сервал»	СЕР
3	ТОВ «Тондо»	ТОН
4	ТОВ «ЦС-Драйв»	ЦСД
5	ТОВ «ТРЕЙДПРОМСЕРВИС»	ТР
6	СП «ПГНК»	ПГН

Після підготовки необхідних даних, можна приступати до процесу оцінювання рейтингу підприємств за допомогою розробленої програмної системи. У результаті оцінювання, на основі введених даних, система визначила рейтинги учасників (табл. 5.).

Таблиця 5. Рейтинги учасників тендеру

«Проммонтаж»	«Сервал»	«Тондо»	«ЦС-Драйв»	«Трейдпромсервис»	«ПГНК»
9,33	7,43	8,57	9,17	7,74	7,79

Таким чином, переможцем тендеру слід вважати ТОВ «Проммонтаж».

Дослідна експлуатація системи показала, що інтерфейс системи зручний і зрозумілий для недосвідченого користувача. Розроблену систему можна рекомендувати для підтримки прийняття рішень в області тендерних закупівель, однак вона є більше універсальним засобом і може використовуватися для прийняття рішень і в інших сферах людської діяльності.

### **Висновки**

1. У роботі розроблений метод рейтингової оцінки об'єктів на основі модифікації методу аналізу ієрархій. Ця модифікація полягає у наступному:

А) Обчислення оцінки показників виконується на основі алгоритму колективної оцінки попарних порівнянь групою експертів. Оцінка показників обчислюється як зважене середнє з використанням коефіцієнта довіри до кожного експерта. Коефіцієнта довіри до експерта коригується на основі якості виконаної їм оцінки.

Б) На основі аналізу графів, проводиться узгодження матриці попарних порівнянь, тобто перевіряється транзитивність заданих матрицею відношень. Така перевірка дозволяє проаналізувати і, у випадку необхідності, скорегувати логіку мислення експерта.

2. На основі запропонованої модифікації методу аналізу ієрархій, розроблена, в середовищі програмування C++ Builder, система підтримки прийняття рішень.

3. Проведено експериментальне використання розробленої системи, щодо оцінки підприємств-учасників тендеру на виконання будівельно-монтажних робіт, яке показало, що розроблену систему можна рекомендувати для підтримки прийняття рішень в області тендерних закупівель, однак вона є більше універсальним засобом і може успішно використовуватися для прийняття рішень і в інших сферах людської діяльності.

### **Література**

1. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – Москва: «Радио и связь», 1993. – 278 с.

2. Коробов В.Б. Преимущества и недостатки метода анализа иерархий / В.Б. Коробов, А.Г. Тутыгин // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. – 2010. – № 122. – С.108-115.

3. Бондаренко В.Є. Елементи суб'єктивної теорії ймовірностей для оцінки можливості шкідливих впливів і деструктивних дій в комп'ютерних мережах / В.Є. Бондаренко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – №4(32). – С. 17-21.

4. Закон України «Про здійснення державних закупівель» [Електронний ресурс] // – Режим доступу : <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/2289-17>.

### *Автор статті*

**Бондаренко Віктор Євгенович** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерних систем та мереж, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +38 099 520 62 19. E-mail: [victorbondarenko@ukr.net](mailto:victorbondarenko@ukr.net)

### *Author of the article*

**Bondarenko Viktor Yevhenovych** – doctor of sciences (technic), associate professor, professor of Department of Computer Systems and Networks, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +38 099 520 62 19. E-mail: [victorbondarenko@ukr.net](mailto:victorbondarenko@ukr.net)

Дата надходження в редакцію: 08.12.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. К.С. Козелкова