

АНАЛІЗ КОЕФІЦІЄНТІВ ВАГИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МОСТІВ  
ЗА МЕТОДОМ ІЄРАРХІЙ

ANALYSIS OF THE WEIGHTING FACTORS FOR THE EVALUATION OF THE TECHNICAL  
CONDITION OF BRIDGES BY THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS



*Давиденко Олександр Олександрович, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, e-mail: [oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua](mailto:oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua), тел. +380504713399*

<http://orcid.org/0000-0003-0176-3256>

**Анотація.** В системі експлуатації транспортних споруд автодорожньої мережі України ранжування мостів за необхідністю ремонтів визначається згідно рейтинговою формули технічного стану. Інтегральна формалізована рейтингова оцінка прийнята в системі експлуатації автодорожніх мостів України за нормативним документом ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012 (ДСТУ 9181:2022 з 01.01.2023). Споруди транспорту. Настапова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів [1]. Коефіцієнти ваги групи елементів мосту є складовими формули від яких напряму залежить присвоєння технічного стану. Отримання нормалізованих коефіцієнтів ваги висвітлені недостатньо та потребують обґрунтування. На практиці не існує усталеної процедури створення ієрархій. Генерування цілей і критеріїв для ієрархій, в першу чергу залежить від галузі і задач, що обирає автор для декомпозиції складної системи. В нашому дослідженні складну систему представляє транспортна споруда, яка має сім груп елементів для мосту через водну перешкоду з регуляційними спорудами; шість груп елементів для мосту без регуляційних споруд; п'ять груп елементів для шляхопроводу. Три групи елементів: прогонова будова, опора та опорні частини, фундаменти є несними елементами мосту. **Ключові слова:** автодорожній міст, експертна рейтингова оцінка, ієрархія, коефіцієнти ваги, матриця переваг, матриця попарного порівняння, метод аналізу ієрархій, технічний стан

**Вступ.** Оцінка технічного стану мосту в цілому є багатокритеріальною проблемою. Вирішення якої реалізується шляхом попарних порівнянь. В багатьох сферах це найзручніший спосіб визначення ступеню переваги. Зокрема, якщо порівнюється  $n$  кількість елементів, то переваги визначаються за допомогою попарних порівнянь  $n \times n$  матриці  $\mathbf{W} = (w_{ij})$ , де  $w_{ij}$  це ступінь переваги елемента  $i$  над елементом  $j$ .

Виділяють три часткових випадки вирішення багатокритеріальних задач аналізу ієрархій [2]:

1) Отримання матриці попарних порівнянь  $\mathbf{W} = (w_{ij})$ , яка задовольняє вимогам  $0 < w_{ij} = 1 / w_{ji}$  для визначення наближених тверджень відношення ступеню переваг елементів  $i$  та  $j$ , що напряму пов'язані з отриманням коефіцієнтів ваги  $w$  з матриці  $\mathbf{W}$  за умови, що  $w_i / w_j$  достатньо наближено відповідає  $w_{ij}$ .

2) Створення матриць переваги та їх поєднання для подальшого визначення вектору вагових коефіцієнтів, значення якого залежать від найвищого рівню ієрархій.

3) Врахування судження більш ніж одного експерта (або створення додаткових критеріїв для оцінки) в рамках однієї ієрархії для подальшого визначення вектору вагових коефіцієнтів, значення якого залежать від судження експертів.

Для визначення коефіцієнтів ваги елементів мостів України в рамках експертної оцінки технічного стану використано підхід відомий як Метод аналізу ієрархій (МАІ) Thomas L. Saaty [3–5]. Метод являє собою процедуру розкладання задачі порівняння на прості складові критерії та прийняття експертних рішень відносно цих складових шляхом попарних порівнянь елементів мосту.

При застосуванні МАІ в сфері транспортного будівництва слід враховувати існуючі парадокси. В дослідженні [6] зазначається, що при великій кількості елементів  $w_{ij} = 9$  в матриці попарних порівнянь результатом парадоксу є нелогічні критерії ваги. Автори [7] показують на прикладі матриці порівнянь розміром  $3 \times 3$  чотири види неузгодженостей:

- 1) Неузгодженість викликана протиріччями.
- 2) Неузгодженість викликана слабкими протиріччями.
- 3) Неузгодженість викликана кінцевістю числового масштабу.
- 4) Неузгодженість викликана дискретністю числового масштабу.

**Мета та задачі дослідження.** Глобальною метою дослідження є обґрунтування та уточнення коефіцієнтів ваги формули (1) рейтингової оцінки мосту в цілому. Для досягнення поставленої мети були розглянуті наступні задачі:

- 1) Аналіз застосування МАІ в оцінці технічного стану споруд.
- 2) Дослідження процесу отримання коефіцієнтів ваги прийнятих згідно нормативних документів України.
- 3) Розробка алгоритму отримання коефіцієнтів ваги.

**Основна частина дослідження.**

Для практичної методики прогнозування технічного стану споруди прийнято числовий критерій технічного стану споруди в цілому – інтегральна формалізована рейтингова оцінка прийнята в системі експлуатації автодорожніх мостів за нормативним документом ДСТУ-Н [1].

Оцінка технічного стану мосту – це загальна характеристика його експлуатаційної придатності, як споруди в цілому з врахуванням стану всіх елементів, з яких складається міст. Показником експлуатаційного стану споруди (мосту в цілому) є формалізована оцінка інженера з обстеження у вигляді числового показника (рейтингу), що використовується для визначення потреб у ремонті або реконструкції мостів та планування експлуатаційних заходів в межах певної ділянки дорожньої мережі.

Експертна експлуатаційна оцінка є середньозваженим значенням визначеного експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди, що розглядаються. За нормативним документом ДСТУ-Н [1] експлуатаційна оцінка технічного стану споруди  $E$  визначається за шкалою безрозмірних коефіцієнтів у 100 балів, обчислюється за формулою

$$E = \frac{80(5 - \sum_{i=1}^{i=7} \alpha_i D_i)}{4} + 20, \tag{1}$$

де  $\alpha_i$  – нормалізовані коефіцієнти впливу стану (вагові коефіцієнти)  $i$ -ї групи елементів на загальний стан споруди,  $i = 1, 2, \dots, 7$ ;  $D_i$  – номер експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди згідно з класифікаційною таблицею документу [1].

Далі стисло опишемо процедуру отримання вагових коефіцієнтів (табл. 1), яка відсутня в нормативному документі [1] та ДСТУ 9181:2022. Ця процедура дає можливість зрозуміти основну ідею вагових коефіцієнтів – визначення долі впливу елементів, як складових із семи груп елементів (несних та конструктивних), на оцінку технічного стану споруди в цілому.

Таблиця 1 – Вагові коефіцієнти  $\alpha_i$  у формулі (1) експертної оцінки технічного стану споруди [1]  
 Table 1 – Weighted  $\alpha_i$  coefficients in the formula (1) of the expert assessment of the technical condition of the structure [1]

Вид споруди	Групи елементів						
	Проїзна частина	Прогонова будова	Опора та опорні частини	Фундамент	Підмостове русло	Регуляційна споруда	Підходи
Міст через водну перешкоду	0,04	0,40	0,25	0,15	0,09	0,05	0,02
Міст без регуляційних споруд	0,05	0,44	0,25	0,15	0,09	-	0,03
Шляхопровід, естакада, віадук	0,05	0,56	0,25	0,12	-	-	0,02

За результатами попарних порівнянь формується матриця переваг, яка відображає відносні переваги кожного з тверджень за прийнятими критеріями. Для попарних порівнянь застосовується шкала відносних переваг наведена в табл. 2.

Розглянемо матрицю попарних порівнянь, яка відображає думку експерта, що приймає рішення, відносно вагомості прийнятих критеріїв. В нашому випадку її розмір  $n = 7$ , що відповідає кількості груп елементів моста відповідно до ДСТУ-Н п.4.2 [1]. Позначимо матрицю порівнянь  $W$ . Формується матриця в такий спосіб.

Наддіагональні елементи матриці переваг  $W$  отримуються шляхом парних порівнянь таким чином, що критерій у рядку  $i = 1, 2, \dots, n$ , оцінюється щодо кожного із критеріїв, представлених у стовпцях. Діагональні елементи  $w_{ii}=w_{jj}=1$ , що є наслідком прийнятої шкали відносних переваг. Піддіагональні елементи приймаються обернено-симетричними відносно наддіагональних:

$$w_{ij} = 1/w_{ji}, \quad i \geq j, \quad i = 2,3, \dots,7; \quad j = 1, 2, \dots, 7, \quad (2)$$

де  $w_{ij}$  – показники відносних переваг компонентів матриці  $W$

Таблиця 2 – Шкала відносних переваг методу ієрархій  
Table 1 – The scale of relative advantages of the method of hierarchies

$w_{ij} = 1$	якщо критерій $i$ однаково важливий по відношенню до критерію $j$
$w_{ij} = 3$	якщо критерій $i$ більш важливий по відношенню до критерію $j$
$w_{ij} = 5$	якщо критерій $i$ явно важливіший по відношенню до критерію $j$
$w_{ij} = 7$	якщо критерій $i$ суттєво важливіший по відношенню до критерію $j$
$w_{ij} = 9$	якщо критерій $i$ безумовно важливіший критерія $j$
$w_{ij} = 2, 4, 6, 8$ в проміжних випадках	

Матриця переваг має такий вид:

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & w_{14} & w_{15} & w_{16} & w_{17} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & w_{24} & w_{25} & w_{26} & w_{27} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} & w_{34} & w_{35} & w_{36} & w_{37} \\ w_{41} & w_{42} & w_{43} & w_{44} & w_{45} & w_{46} & w_{47} \\ w_{51} & w_{52} & w_{53} & w_{54} & w_{55} & w_{56} & w_{57} \\ w_{61} & w_{62} & w_{63} & w_{64} & w_{65} & w_{66} & w_{67} \\ w_{71} & w_{72} & w_{73} & w_{74} & w_{75} & w_{76} & w_{77} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де  $w_{ij}$  – критерії відносної важливості компонентів матриці; рядки й стовпці відповідають такому порядку:  $i = j = 1$  – елементи прогонової будови;  $i = j = 2$  – опори та опорні частини;  $i = j = 3$  – фундаменти;  $i = j = 4$  – підмостове русло;  $i = j = 5$  – регуляційні споруди;  $i = j = 6$  – елементи проїзної частини;  $i = j = 7$  – підходи.

Числові елементи сформованої матриці переваг  $W$  мають такі значення:

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 1/2 & 1 & 3/2 & 4/2 & 5/2 & 6/2 & 7/2 \\ 1/3 & 2/3 & 1 & 4/3 & 5/3 & 6/3 & 7/3 \\ 1/4 & 2/4 & 3/4 & 1 & 5/4 & 6/4 & 7/4 \\ 1/5 & 2/5 & 3/5 & 4/5 & 1 & 6/5 & 7/5 \\ 1/6 & 2/6 & 3/6 & 4/6 & 5/6 & 1 & 7/6 \\ 1/7 & 2/7 & 3/7 & 4/7 & 5/7 & 6/7 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Вектор коефіцієнтів впливу  $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2, \dots, w_n]^T$  знаходиться з рівняння

$$\mathbf{W}\mathbf{w} = n \mathbf{w}, \tag{5}$$

де  $n$  – кількість критеріїв на заданому рівні ієрархії і одночасно *розмір квадратної матриці попарних порівнянь*,  $n = 7$ .

Рівняння (2.5) є подібним до класичного рівняння, яке зв'язує квадратну матрицю з власним числом і власним вектором:

$$\mathbf{A}\mathbf{w} = \lambda_{\max} \mathbf{w}, \tag{6}$$

де  $\lambda_{\max}$  – максимальне власне число матриці  $\mathbf{A}$ ;

$\mathbf{w}$  – максимальний власний вектор.

Звідси виходить, що шуканий вектор коефіцієнтів впливу  $\mathbf{w}$  є максимальним власним вектором матриці  $\mathbf{W}$ , якщо максимальне власне число  $\lambda_{\max}$  дорівнює порядку матриці  $n$ .

Отриманий з матричного рівняння (6) максимальний власний вектор – вектор переваг нормалізується:

$$\alpha_i = \frac{w_i}{\sum_1^n w_i}, \tag{7}$$

Очевидно, що вектор  $\alpha_i$  за формулою (7) задовольняє умові нормалізації

$$\sum_1^n \alpha_i = 1. \tag{8}$$

Перевіримо вагові коефіцієнти  $\alpha_i$  табл. 1 на відповідність умові нормалізації (8).

Таблиця 3 – Відповідність вагових коефіцієнтів  $\alpha_i$  умові нормалізації

Table 3 – Compliance of weight coefficients  $\alpha_i$  with the normalization condition

Вид споруди	Відповідність умові нормалізації, $\sum_1^n \alpha_i = 1$
Міст через водну перешкоду	1,00
Міст без регуляційних споруд	1,01
Шляхопровід, естакада, віадук	1,00

Для кожної групи споруд вагові коефіцієнти  $\alpha_i$  – нормалізовані. Для мосту без регуляційних споруд, очевидно, допущено незначна похибка в округленні коефіцієнтів. Звісно в ДСТУ-Н [1] необхідно скорегувати в майбутньому значення вагових коефіцієнтів, але це не впливає на кінцеву рейтингову оцінку в значній мірі.

Аналіз вітчизняних публікацій показав відсутність обґрунтування коефіцієнтів ваги представлених у табл. 1, також не представлено ієрархію та матрицю попарних порівнянь за якими ці коефіцієнти були отримані. Отже, опишемо процес отримання власних пропозованих коефіцієнтів ваги. В нашому випадку складну систему представляє транспортна споруда, яка має сім груп елементів для мосту через водну перешкоду з регуляційними спорудами; шість груп елементів для мосту без регуляційних споруд; п'ять груп елементів для шляхопроводу. Три групи елементів: прогонова будова, опора та опорні частини, фундаменти є відповідальними елементами мосту. Тепер нам необхідно визначити силу, з якою інші чотири групи елементів впливають на несні елементи враховуючи величини дії всіх груп елементів на визначення рейтингової оцінку мосту в цілому.

Визначимо шкалу пріоритетів для шляхопроводу з групами елементів

A. Елементи прогонової будови.

B. Опори та опорні частини.

C. Фундаменти.

D. Елементи проїзної частини.

E. Підходи.

$$\mathbf{W} = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C & D & E \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1,5 & 1,5 & 6 & 9 \\ 0,67 & 1 & 1 & 4 & 6 \\ 0,67 & 1 & 1 & 4 & 6 \\ 0,17 & 0,25 & 0,25 & 1 & 1,5 \\ 0,11 & 0,17 & 0,17 & 0,17 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (9)$$

Матриця попарних порівнянь  $\mathbf{W}$  (9) для шляхопроводу була побудована виходячи з наступних суджень

1. Елемент  $A$  незначно важливіший за  $B$ , запишемо 1,5.
2. Елементи  $B$  і  $C$  однаково важливі, запишемо 1,5.
3. Елемент  $C$  значно важливіший за  $D$ , запишемо 6.
4. Елемент  $D$  значно важливіший за  $E$ , запишемо 9.

При порівнянні елемента с самим собою маємо рівноцінну значимість, так як це пересічення строки  $A$  з стовбцем  $A$  в позиції  $(A, A)$  записуємо 1. Тому головна діагональ матриці повинна складатися з одиниць. На пересіченні стовбців і строк записуємо зворотні відповідні величини, наприклад  $(B, D) = 1,5/6 = 0,25$ , тоді  $(D, B) = 6/1,5 = 4$ .

Для прискорення підбору та аналізу коефіцієнтів ваги, скористаємося алгоритмом, який напишемо на внутрішній мові MathCad:

$$\begin{aligned}
 & A := 1 \quad B := 1.5 \quad C := 1.5 \quad D := 6 \quad E := 9 \\
 & \mathbf{W} := \begin{pmatrix} A & B & C & D & E \\ \frac{A}{B} & 1 & \frac{C}{B} & \frac{D}{B} & \frac{E}{B} \\ \frac{A}{C} & \frac{B}{C} & 1 & \frac{D}{C} & \frac{E}{C} \\ \frac{A}{D} & \frac{B}{D} & \frac{C}{D} & 1 & \frac{E}{D} \\ \frac{A}{E} & \frac{B}{E} & \frac{C}{E} & \frac{D}{E} & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{W} = \begin{pmatrix} 1 & 1.5 & 1.5 & 6 & 9 \\ 0.67 & 1 & 1 & 4 & 6 \\ 0.67 & 1 & 1 & 4 & 6 \\ 0.17 & 0.25 & 0.25 & 1 & 1.5 \\ 0.11 & 0.17 & 0.17 & 0.67 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & w := \text{eigenvals}(\mathbf{W})_2 \cdot \text{eigenvecs}(\mathbf{W})^{(2)} \\
 & \omega := \frac{w}{\sum_{i=1}^5 w_i} = \begin{pmatrix} 0.38 \\ 0.26 \\ 0.26 \\ 0.06 \\ 0.04 \end{pmatrix} \quad \sum_{i=1}^5 \omega_i = 1.00
 \end{aligned}$$

Рисунок 1 – Алгоритм аналізу коефіцієнтів ваги на внутрішній мові MathCad  
 Figure 1 – Algorithm for analyzing the coefficients of weight on the internal language of Mathcad

Де  $\text{eigenvals}(\mathbf{W})$  – обчислює власні значення квадратної матриці  $\mathbf{W}$ ;  $\text{eigenvecs}(\mathbf{W})$  – обчислює власний вектор квадратної матриці  $\mathbf{W}$ , значенням функції є матриця, стовбці якої є власними векторами матриці. Порядок слідування векторів відповідає порядку слідування власних значень, що

обчислюються функцією  $\text{eigenvals}(\mathbf{W})$ . Алгоритм MathCad (рис. 1) базується на класичному рівнянні, яке зв'язує квадратну матрицю з власним числом і власним вектором:

$$\mathbf{W}\mathbf{w} = \lambda_{\max} \mathbf{w}, \quad (10)$$

де  $\lambda_{\max}$  – максимальне власне число матриці  $\mathbf{W}$ ;

$\mathbf{w}$  – максимальний власний вектор.

Звідси виходить, що шуканий вектор коефіцієнтів впливу  $\mathbf{w}$  є максимальним власним вектором матриці  $\mathbf{W}$ , якщо максимальне власне число  $\lambda_{\max}$  дорівнює порядку матриці  $n$ .

Далі наведемо матрицю для мосту через водну перешкоду (11)

A. Елементи прогонової будови.

B. Опори та опорні частини.

C. Фундаменти.

D. Підмостове русло.

E. Регуляційні споруди.

F. Елементи проїзної частини.

G. Підходи.

	A	B	C	D	E	F	G
A	1	1,20	1,20	3	5	6	7
B	0,83	1	1	2,50	4,17	5	5,83
C	0,83	1	1	2,50	4,17	5	5,83
D	0,33	0,40	0,40	1	1,67	2	2,33
E	0,20	0,24	0,24	0,60	1	1,20	1,40
F	0,17	0,20	0,20	0,50	0,83	1	1,17
G	0,14	0,17	0,17	0,43	0,71	0,86	1

(11)

Матриця попарних порівнянь для мосту без регуляційних споруд (12)

A. Елементи прогонової будови.

B. Опори та опорні частини.

C. Фундаменти.

D. Підмостове русло.

E. Елементи проїзної частини.

F. Підходи.

	A	B	C	D	E	F
A	1	1,50	1,50	6	8	9
B	0,67	1	1	4	5,33	6
C	0,67	1	1	4	5,33	6
D	0,17	0,25	0,25	1	1,33	1,50
E	0,13	0,19	0,19	0,75	1	1,13
F	0,11	0,17	0,17	0,67	0,89	1

(12)

Обчислені вагові коефіцієнти  $w_i$  зведемо до таблиці 4

Таблиця 4 – Вагові коефіцієнти  $w_i$   
 Таблица 4 – Weight coefficients  $w_i$

Вид споруди	Групи елементів						
	Проїзна частина	Прогонова будова	Опора та опорні частини	Фундамент	Підмостове русло	Регуляційна споруда	Підходи
Міст через водну перешкоду	0,05	0,28	0,24	0,24	0,09	0,06	0,04
Міст без регуляційних споруд	0,05	0,37	0,24	0,24	0,06	-	0,04
Шляхопровід, естакада, віадук	0,06	0,38	0,26	0,26	-	-	0,04

Для вище описаних залежностей девіація узгодженості може бути отримана за формулою [4, 6]:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (13)$$

де  $CI$  – consistency index (коефіцієнт узгодженості);

$n$  – кількість критеріїв на заданому рівні ієрархії і одночасно розмір квадратної матриці попарних порівнянь.

Коефіцієнт узгодженості ( $CI$ ) отриманий випадковим чином для обернено-симетричної матриці з критеріями від 1 до 9 з відповідними зворотними значеннями елементів називається випадковим коефіцієнтом (random index,  $RI$ ) [4]. Що є середнім значенням  $CI$ , отриманим із 10 000 випадкових матриць порівняння, записи яких були згенеровані випадковим чином за допомогою шкали відносних переваг методу ієрархій від 1 до 9 (табл. 2). Відношення коефіцієнта узгодженості ( $CI$ ) до випадкового коефіцієнту ( $RI$ ) для матриці однакового порядку називається показником узгодженості (consistency ratio,  $CR$ ):

$$CR = \frac{CI}{RI}. \quad (14)$$

Сааті вважає [4, 8], що значення  $CR$  нижче 0,10 вказує на те, що попарна матриця порівняння має прийнятну узгодженість. У таблиці 5 наведені значення  $RI$  (друга строка) для матриць різного порядку  $n$  (перша строка)

Таблиця 5 Випадковий коефіцієнт ( $RI$ ) [6, 8]  
 Table 5 The random index ( $RI$ ) [6, 8]

$n$	3	4	5	6	7	8	9	10
$RI$	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

За формулами (13, 14) визначаємо коефіцієнт узгодженості ( $CI$ ), випадковий коефіцієнт ( $RI$ ) та показник узгодженості для перевірки узгодженостей матриць попарних порівнянь (9, 11, 12):

$$\begin{aligned} \lambda_{\max} = 5; CI &= \frac{5 - 5}{5 - 1} = 0; CR = \frac{0}{1,11} = 0. \\ \lambda_{\max} = 6; CI &= \frac{6 - 6}{6 - 1} = 0; CR = \frac{0}{1,25} = 0. \\ \lambda_{\max} = 7; CI &= \frac{7 - 7}{7 - 1} = 0; CR = \frac{0}{1,35} = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Отже, матриці попарних порівнянь (9, 11, 12) є узгодженими. Постає відкрите питання, чи є узгодженими матриці попарних порівнянь для коефіцієнтів ваги за ДСТУ-Н [1] та ДСТУ 9181:2022 (на заміну з 01.01.2023).

Метод аналізу ієрархій в першу чергу є простим математичним апаратом, який тісно пов'язаний з досвідом та інтуїцією експерта з обстеження мостів. Розробка моделі ієрархії передбачає послідовне виконання декількох етапів [9]:

1. Структурування задачі та виявлення зв'язків між її складовими.
2. Формування критеріїв оцінювання.
3. Аналіз та вибір альтернативних пріоритетів.

Для коефіцієнтів ваги регламентованих ДСТУ-Н [1] та ДСТУ 9181:2022 не зазначається модель ієрархії за якими вони визначені. Враховуючи групи елементів мостів можна зробити припущення, як виглядає модель ієрархій для яких отримані регламентовані коефіцієнти ваги елементів мосту.

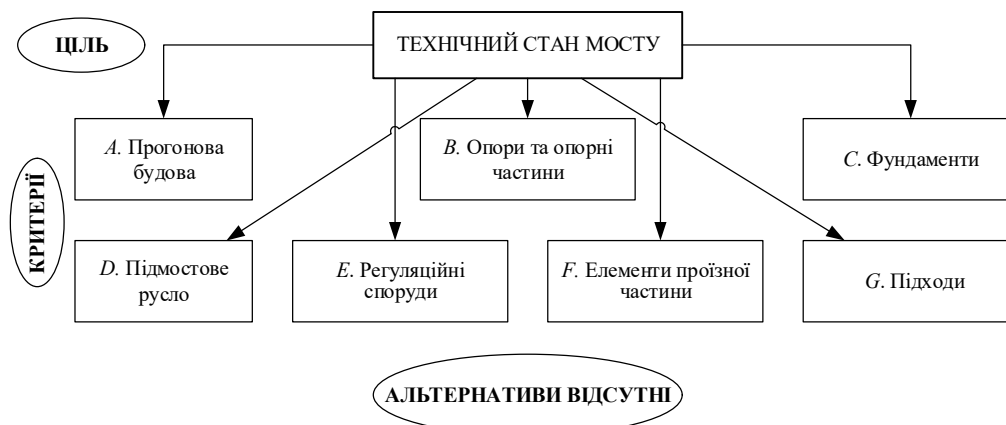


Рисунок 2 – Графік ієрархії за моделлю ДСТУ-Н [1] (ДСТУ 9181:2022 з 01.01.2023)  
 Figure 2 – Hierarchy graph based on the DSTU-N model [1] (DSTU 9181: 2022 from 01.01.2023)

**Висновки.** Метод аналізу ієрархій Саати може використовуватися для прийняття рішення щодо оцінки технічного стану автодорожніх мостів. Проте слід дослідити можливість використання інших методів з прийняття рішень, наприклад: метод розрахунку компромісних кривих, метод Джоффіона-Дайера-Файнберга, метод випадкового пошуку та ін. [9]

Коефіцієнти ваги, що регламентуються ДСТУ-Н [1] та ДСТУ 9181:2022 (вступає в дію на заміну з 01.01.2023) потребують наукового обґрунтування, перевірки на узгодженість та адекватність у порівнянні з іншими моделями ієрархій.

Метод аналізу ієрархій в першу чергу орієнтовано на експерта, що приймає рішення для конкретної задачі в галузі. В такому разі не зрозуміло, чому коефіцієнти ваги регламентуються Державними стандартами України для всіх мостів та не враховують наступні критерії: тип матеріалу, статичну схему, довжину мосту, дату будівництва тощо. Особливо важливо врахувати мету оцінки технічного стану, тому що в залежності від неї пріоритет елементів може змінюватися.

Очевидно, що графік ієрархії за моделлю ДСТУ-Н [1] та ДСТУ 9181:2022 є примітивним та не враховує альтернативні пріоритети для прийняття рішень. Необхідно в рамках методу аналізу ієрархій розробити декілька моделей та їх апробувати. Дослідження показало необхідність у методиці розробки моделей ієрархій для користування інженерами під час обстеження мостів для кожного об'єкту окремо з врахуванням їх особливостей, пріоритетів та мети оцінки технічного стану.

#### Перелік посилань

1. ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012. Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. [Чинний від 2013-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2012. 116 с.
2. Barzilai J., Cook W.D., Golany B. The analytic hierarchy process: structure of the problem and its solutions // Systems and management science by extremal methods / под ред. F.Y. Phillips, J.J. Rousseau. Boston, MA: Springer US, 1992. P. 361–371.
3. Saaty T.L. A scaling method for priorities in hierarchical structures // J. Math. Psychol. 1977. V. 15. № 3. P. 234–281.
4. Saaty T.L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. New York: McGraw-Hill International Book Co., 1980.



5. Saaty R.W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used // *Mathematical Modelling*. 1987. V. 9. № 3–5. P. 161–176.
6. Xu K., Xu J. A Direct Consistency Improvement Method for the Probability-Hesitant Analytic Hierarchy Process // *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 9445–9458.
7. Zhang H. и др. Analyzing Saaty’s consistency test in pairwise comparison method: a perspective based on linguistic and numerical scale // *Soft comput.* 2016. V. 22. № 6. P. 1933–1943.
8. Saaty T.L. Deriving the AHP 1-9 Scale form First Principles Proceedings of the international symposium on the analytic hierarchy process.: Creative Decisions Foundation, 2001.
9. Synenko M. Saaty’s method decision-making on the example of a small business enterprise [Ukrainian] // *Biznes ta intelektualnyi kapital*. 2018. V. Intelekt XXI.

#### ANALYSIS OF THE WEIGHTING FACTORS FOR THE EVALUATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF BRIDGES BY THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

**Davydenko Oleksandr O.**, PhD (Candidate of Technical Sciences), National Transport University, Associate Professor of Department of Bridges, Tunnels and Hydrotechnical Structures, e-mail: oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua, tel. +380504713399, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelianovycha-Pavlenka, 1, r.229. <http://orcid.org/0000-0003-0176-3256>.

**Abstract.** In the system of operation of the transport structures of the highway network of Ukraine, the ranking of bridges as necessary for repairs is determined according to the rating formula of the technical condition. The integral formalized rating assessment was adopted in the system of operation of the highway bridges of Ukraine under the normative document DSTU-N BV.3-23: 2012 (DSTU 9181: 2022 from 01.01.2023). Transport structures. Guidelines for evaluation and prediction of the technical condition of highways [1]. The weight coefficients of the group of bridge elements are components of the formula on which the direction depends on the assignment of the technical condition. Obtaining normalized weight ratios are insufficient and require justification. In practice, there has yet to be an established procedure for creating hierarchies. First, the generation of goals and criteria for hierarchies depends on the industry and the tasks the author chooses to decompose a complex system. In our study, a complex system is a transport structure with seven groups of elements for the bridge through a water obstacle with regulatory structures; six groups of elements for the bridge without regulatory structures; Five groups of elements for the overpass. Three groups of elements: run structure, support, and supporting parts, foundations are the necessary elements of the bridge.

**Keywords:** highway bridge, expert rating, hierarchy, weight coefficients, reciprocal matrix, pairwise comparison matrix, Analytic Hierarchy Process (AHP), technical condition

#### References

1. DSTU-N B.V.2.3-23:2012. Sporudy transportu. Nastanova z otsiniuvannia i prohnozuvannia tekhnichnoho stanu avtodorozhnikh mostiv. [Chynnyi vid 2013-07-01]. Vyd. ofits. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2012. 116 s. [in Ukrainian]
2. Barzilai J., Cook W.D., Golany B. The analytic hierarchy process: structure of the problem and its solutions // *Systems and management science by extremal methods / под ред. F.Y. Phillips, J.J. Rousseau*. Boston, MA: Springer US, 1992. P. 361–371. [in English].
3. Saaty T.L. A scaling method for priorities in hierarchical structures // *J. Math. Psychol.* 1977. V. 15. № 3. P. 234–281. [in English].
4. Saaty T.L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. New York: McGraw-Hill International Book Co., 1980. [in English].
5. Saaty R.W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used // *Mathematical Modelling*. 1987. V. 9. № 3–5. P. 161–176. [in English].
6. Xu K., Xu J. A Direct Consistency Improvement Method for the Probability-Hesitant Analytic Hierarchy Process // *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 9445–9458. [in English].
7. Zhang H. и др. Analyzing Saaty’s consistency test in pairwise comparison method: a perspective based on linguistic and numerical scale // *Soft comput.* 2016. V. 22. № 6. P. 1933–1943. [in English].
8. Saaty T.L. Deriving the AHP 1-9 Scale form First Principles Proceedings of the international symposium on the analytic hierarchy process.: Creative Decisions Foundation, 2001. [in English].
9. Synenko M. Saaty’s method decision-making on the example of a small business enterprise [Ukrainian] // *Biznes ta intelektualnyi kapital*. 2018. V. Intelekt XXI. [in English].