

Ткаченко Олександр Вікторович*Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ*
ORCID 0009-0009-6972-5388**Волохін Віталій Васильович***Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ*
ORCID 0009-0001-8000-3193**Лащевська Наталія Олександрівна***Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ*
ORCID 0000-0003-2148-115X**Ноздренков Валерій Станіславович***Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси*
ORCID 0009-0002-0579-6821

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯМ НА ОБ'ЄКТАХ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

***Анотація.** В умовах збільшення споживання електроенергії та здорожчання енергоресурсів все більше проявляється залежність сучасної інфраструктури від надійної та безперебійної подачі електроенергії. На жаль, в умовах сьогодення у багатьох регіонах країни все частіше проявляють себе збої в електроживленні різних об'єктів (як промислових, так і цивільних). Тому перехід енергосистем, що використовують виключно традиційні джерела енергії, до енергосистем, що додатково містять альтернативні джерела електричної енергії є актуальною науково-технічною задачею. Строк безвідмовної роботи та ККД альтернативних джерел залежать від багатьох факторів (включаючи погодні) та вимог об'єктів споживання, то ж, необхідно розробити способи вибору джерела живлення залежно від даних умов. Таким чином, постає питання багатокритеріального вибору. У статті розглядається застосування методу аналізу ієрархій (MAI) для автоматизації управління та вибору оптимального альтернативного джерела живлення на об'єктах транспортної інфраструктури. Для дослідження було розглянуто три джерела живлення, а саме: фотобатарея, вітрогенератор та дизельний генератор. Проведено декомпозицію задачі, визначено критерії оцінки альтернатив та виконано попарне порівняння варіантів з урахуванням погодних умов, екологічності та вартості енергії. Оцінено узгодженість експертних думок та відповідність отриманих результатів критеріям оптимальності. Запропонований підхід сприяє підвищенню енергоефективності та безперебійності функціонування інфраструктурних об'єктів, забезпечуючи обґрунтоване прийняття рішень щодо використання відновлюваних джерел енергії. Методика інтегрується з автоматизованими системами управління, що дозволяє аналізувати дані в реальному часі через мережні інтерфейси, автоматизувати перемикання джерел живлення та моніторити стан енергосистем на базі інтелектуальних інформаційних систем. Це забезпечує адаптацію до динамічних умов, таких як зміни погоди або навантаження на мережу. Дослідження може бути впроваджене в кіберфізичні системи критичної інфраструктури, де взаємодія апаратних компонентів і програмного забезпечення є ключовою для енергетичної стійкості.*

***Ключові слова:** метод аналізу ієрархій, інформаційні системи, автоматизовані системи управління, альтернативні джерела живлення, транспортна інфраструктура, оптимізація, енергоефективність, безперебійність, кіберфізичні системи.*

Tkachenko Oleksandr*State University of Information and Communication Technologies, Kyiv*

ORCID 0009-0009-6972-5388

Volokhin Vitalii*State University of Information and Communication Technologies, Kyiv*

ORCID 0009-0001-8000-3193

Lashchevska Nataliia*State University of Information and Communication Technologies, Kyiv*

ORCID 0000-0003-2148-115X

Nozdrenkov Valerii*Cherkasy State Technological University, Cherkasy*

ORCID 0009-0002-0579-6821

APPLICATION OF THE HIERARCHY ANALYSIS METHOD FOR POWER SUPPLY MANAGEMENT SYSTEMS AT TRANSPORT INFRASTRUCTURE FACILITIES

Annotation. *In the context of increasing electricity consumption and rising energy costs, the dependence of modern infrastructure on a reliable and uninterrupted power supply is becoming more evident. Unfortunately, in today's conditions, many regions of the country are increasingly experiencing power supply failures at various facilities (both industrial and civilian). Therefore, the transition of energy systems that rely solely on traditional energy sources to systems that additionally incorporate alternative sources of electrical energy is a relevant scientific and technical challenge.*

The failure-free operation time and efficiency of alternative sources depend on numerous factors (including weather conditions) and the requirements of consumer facilities. Hence, it is necessary to develop methods for selecting a power source based on these conditions. Thus, the problem of multi-criteria decision-making arises. This article examines the application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) method for selecting the optimal alternative power source for transport infrastructure facilities.

Three power sources were considered in the study: a photovoltaic panel, a wind turbine, and a diesel generator. The problem was decomposed, evaluation criteria for the alternatives were determined, and pairwise comparisons of options were performed, taking into account weather conditions, environmental impact, and energy cost. The consistency of expert opinions and the compliance of the obtained results with optimality criteria were assessed.

The proposed approach contributes to increasing energy efficiency and ensuring the uninterrupted operation of infrastructure facilities by providing a well-founded decision-making process regarding the use of renewable energy sources. The methodology integrates with computer control systems, allowing real-time data analysis via network interfaces, automation of power source switching, and monitoring of energy system status using information systems. This ensures adaptation to dynamic conditions, such as weather changes or network load fluctuations. The study can be implemented in cyber-physical critical infrastructure systems, where the interaction between hardware components and software is key to energy sustainability.

Keywords: *Analytic Hierarchy Process, information systems, automated control systems, alternative power sources, transport infrastructure, optimization, energy efficiency, reliability, cyber-physical systems.*

1. Вступ. За прогнозом споживання відновлюваної енергії в енергетиці, теплоенергетиці та транспорті зросте майже на 60% протягом 2024-2030 років. Це зростання збільшить частку відновлюваних джерел енергії в кінцевому споживанні енергії майже до 20% до 2030 року, порівняно з 13% у 2023 році. Виробництво електроенергії з відновлюваних джерел енергії становить понад три чверті загального зростання завдяки постійній політичній підтримці в більшій кількості (більш ніж 130) країн, зниження витрат і розширення використання електроенергії для автомобільного транспорту та транспортної системи [1].

У секторі електроенергетики частка відновлюваної енергії, за прогнозами, зросте з 30% у 2023 році до 46% у 2030 році. Майже все це зростання припадає на сонячну енергію та вітер.

Транспортна інфраструктура відіграє дуже важливу роль в організації життя людей та в економіці країни. Вона потребує постійного вдосконалення та оновлення за допомогою сучасних систем. Перехід вузлів керування інфраструктури на альтернативні джерела, дасть можливість зробити інфраструктуру більш енергонезалежною та допоможе економити кошти на її утримання.

У зв'язку з цим, необхідно розробляти і впроваджувати рішення про перехід живлення вузлів транспортної інфраструктури на живлення альтернативними джерелами.

На об'єктах транспортної інфраструктури вже дуже часто почали використовувати додаткові джерела живлення, для покращення роботи з точки зору безперебійності, та для економії коштів витрачених на електричну енергію. Віддалені від міст пішохідні переходи та світлофори обладнують сонячними панелями та системами акумуляції енергії, що дозволяє цим об'єктам працювати автономно протягом розрахункового часу.

Для використання різних джерел живлення в одній системі необхідно розробити методику, яка дозволить системі в автоматичному режимі приймати рішення про перехід на інше джерело живлення.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метод аналізу ієрархій є широко визнаним інструментом багатокритеріального аналізу та прийняття рішень. В останні роки науковці активно досліджують застосування МАІ для оптимізації електроживлення на об'єктах транспортної інфраструктури. Важливе місце займають дослідження, присвячені інтеграції МАІ із сучасними інформаційними технологіями. У праці Федорука [1] представлено використання багатокритеріальної оцінка ефективності інвестування в енергозбереження методом аналізу ієрархій. Також заслуговує на увагу аналіз використання МАІ для адаптивного управління енергосистемами. У працях [2-3] розглядаються інтелектуальні системи керування електроживленням та інтелектуальні системи моніторингу джерел електроживленням.

3. Мета і задачі дослідження. Метою роботи є дослідження шляхів підвищення ефективності роботи систем управління електроживлення використовуючи метод аналізу ієрархій.

Для вирішення вище зазначеної проблематики були поставлені наступні завдання:

- проаналізувати системи управління електроживленням;
- дослідити методи вибору оптимальних параметрів таких систем;
- дослідити застосування методу аналізу ієрархій для автоматизації управління

та вибору оптимального альтернативного джерела живлення.

4. Аналіз методів вибору. Системи управління електроживленням є комплексом апаратних і програмних засобів, призначених для моніторингу, аналізу, розподілу та оптимізації електроенергії в різних об'єктах, включаючи транспортну інфраструктуру.

До основних функцій таких систем належать:

- Моніторинг – контроль параметрів електромережі (напруга, струм, частота тощо).
- Управління – автоматизоване чи ручне регулювання подачі електроенергії.
- Оптимізація – зменшення втрат електроенергії та підвищення ефективності її використання.

- Захист – запобігання аварійним ситуаціям та реагування на несправності.

В сучасних умовах до особливих характеристик мереж електроживлення відноситься можливість використання альтернативного джерела живлення. Для кожного альтернативного джерела живлення є свої характеристики та параметри, за яких вони будуть працювати ефективно та довговічно. Для цього важливо визначити критерії, за якими необхідно оцінювати доцільність переходу на інше джерело живлення. Маємо задачу багатокритеріального вибору, яку можна вирішити наступними способами:

- принцип Парето;
- метод лінійної згортки;
- метод головного критерію;
- метод аналізу ієрархій (МАІ).

Принцип Парето – це емпіричне правило, яке стверджує, що для багатьох явищ 80 відсотків наслідків спричинені 20 відсотками причин. Метод не є доведеним наукою законом тому дає приблизну відповідь.

Метод головного критерію базується на принципі виборі одного критерію, який вважається головним, і далі вирішується однокритеріальна задача де інші критерії визначаються як деякі обмеження. В такому методі часто можна зіштовхнутися з труднощами, коли є декілька головних критеріїв.

Лінійна згортка базується на неявному постулаті: «низька оцінка хоча б за одним критерієм тягне за собою низьке значення функції корисності». Водночас цей метод має використовуватися тільки для задач, що задовольняють таке припущення: «низька оцінка за одним критерієм може бути компенсована високою оцінкою за іншим».

Використання МАІ дозволяє ранжувати альтернативи на основі їх відповідності визначеним критеріям та вагомості цих критеріїв. Використовуючи ієрархічну структуру, метод дозволяє розбити складну задачу на більш прості під-задачі, що сприяє кращому розумінню проблеми та забезпечує більш об'єктивні результати. Цей метод допомагає зменшити суб'єктивність прийняття рішень, забезпечує системність та об'єктивність в оцінці альтернатив, а також сприяє покращенню узгодженості рішень шляхом врахування інтересів та вагомості різних факторів[5].

Враховуючи перераховані вище особливості методів багатокритеріального вибору, для поставленої цілі будемо використовувати метод аналізу ієрархій. Головною перевагою методу є можливість поєднання в процесі вибору альтернатив як кількісних, так і якісних характеристик проблеми (мети).

5. Реалізація методу. Вирішується задача оптимального вибору джерела альтернативної енергії за допомогою методу аналізу ієрархій. На рис. 1 зображено схему реалізації методу, де верхній (перший) рівень ієрархії представляє собою мету, яку потрібно досягти (вибір найкращого джерела живлення). На другому рівні розташовуються критерії, що впливають на досягнення мети (погодні умови Q1, екологічність Q2, вартість енергії Q3). Третій рівень ієрархії – альтернативи, серед яких відбувається вибір. В даній роботі пропонуються до вибору такі альтернативи: фотобатарея W1, вітрогенератор W2, дизельний генератор W3.

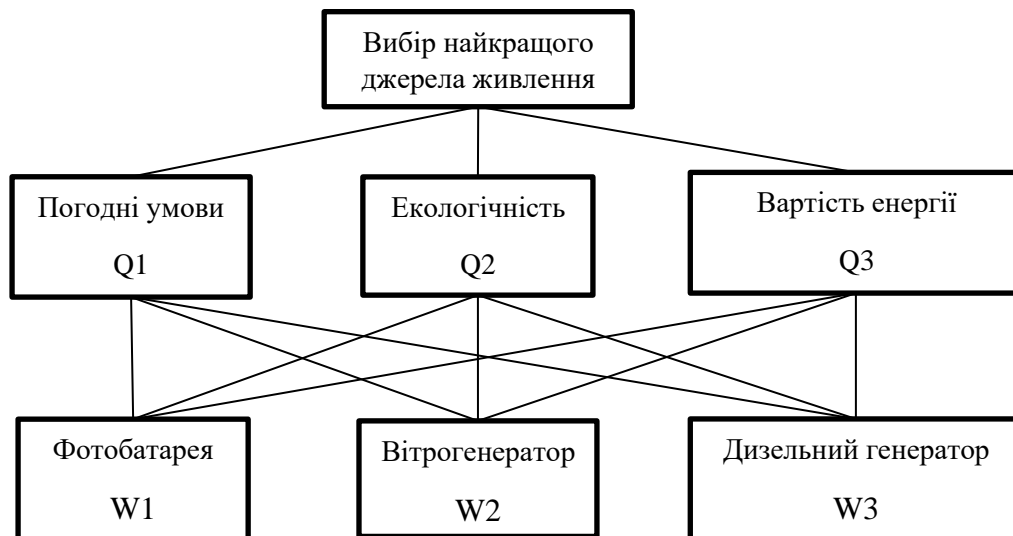


Рис 1. Схематичне зображення поставленої задачі

- критерій «Погодні умови Q1» - прийнято варіант наявності сонця і вітру.
- Критерій «Екологічність Q2» - враховано екологічність джерела живлення, з точки зору нанесеної шкоди на екосистему.
- Критерій «Вартість енергії Q3» - враховано вартість виробленої енергії з урахуванням вартості і амортизації обладнання.

Необхідно провести парне порівняння критеріїв за важливістю, що буде матрицею порівнянь розмірності 3x3 (Q). Так як всі альтернативи пов'язані з усіма критеріями, то й оцінки альтернатив по кожному з критеріїв будуть 3 матриць парних порівнянь 3x3 (Q1÷Q3). Як результат порівняння Т. Сааті рекомендує використовувати власний вектор матриці парних порівнянь, що відповідає максимальному власному значенню λ_{\max} . Однак його використання занадто складне, тому порахуємо альтернативним способом: методом обчислення середнього геометричного [6].

Алгоритм підрахунку з урахуванням середнього геометричного полягає у наступному: – по кожному рядку підраховується середнє геометричне елементів рядка; – отримані середні діляться на загальну суму середніх геометричних всіх рядків, тобто, відбувається нормування рядкових середніх геометричних.

Нормовані рядкові суми (W_i) є дійсними числами в інтервалі від 0 до 1, таким чином, обчислюється внесок (вага) кожного рядка в загальне середнє геометричне.

$$W_i = \frac{(\prod_{j=1}^N \alpha_{ij})^{1/N}}{\sum_{i=1}^N (\prod_{j=1}^N \alpha_{ij})^{1/N}}$$

Отримані «ваги» альтернатив за критеріями формують матрицю ваг [A], множення якої на вектор «ваг» (B) важливості критеріїв (фактично, лінійна згортка) дає результуючі значення для кожної з альтернатив:

$$[A] * B = \begin{bmatrix} W1(Q1) & W1(Q2) & W1(Q3) \\ W2(Q1) & W2(Q2) & W2(Q3) \\ W3(Q1) & W3(Q2) & W3(Q3) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} W1(Q) \\ W2(Q) \\ W3(Q) \end{bmatrix}$$

Використовуючи наведений огляд критеріїв для запропонованої ієрархії (рис. 1), проведемо парні порівняння.

1. Порівняння критеріїв (Q).

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1/5 \\ 1/4 & 1 & 1/9 \\ 5 & 9 & 1 \end{bmatrix}$$

2. Обчислення «ваг» методом середнього геометричного:

$$b_1(Q) = \sqrt[3]{1 * 4 * \frac{1}{5}} = 0,928$$

$$b_2(Q) = \sqrt[3]{\frac{1}{4} * 1 * \frac{1}{9}} = 0,303$$

$$b_3(Q) = \sqrt[3]{5 * 9 * 1} = 3,557$$

$$B = \sum_{i=1}^3 b_i = 0,928 + 0,303 + 3,557 = 4,788$$

$$\bar{W}(Q) \frac{b_i(Q)}{B} = \begin{bmatrix} 0,894/4,788 \\ 0,303/4,788 \\ 3,557/4,788 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,194 \\ 0,063 \\ 0,743 \end{bmatrix}$$

Аналогічно обраховуються значення «ваг» альтернатив по кожному з критеріїв. Тому наведемо лише матриці парних порівнянь, приклад розрахунку для першого критерію (Q1) та результуючу матрицю ваг.

3. Порівняння альтернатив за критерієм «Погодні умови Q1»

$$Q_1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1/9 \\ 1 & 1 & 1/9 \\ 9 & 9 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\bar{W}(Q_1) \frac{b_i(Q_1)}{B} = \begin{vmatrix} 0,481/5,288 \\ 0,481/5,288 \\ 4,327/5,288 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,091 \\ 0,091 \\ 0,818 \end{vmatrix}$$

4. Порівняння альтернатив за критерієм «Екологічність Q2»

$$Q_2 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 9 \\ 1 & 1 & 9 \\ 1/9 & 1/9 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\bar{W}(Q_2) \frac{b_i(Q_2)}{B} = \begin{vmatrix} 2,080/4,391 \\ 2,080/4,391 \\ 0,231/4,391 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,474 \\ 0,474 \\ 0,053 \end{vmatrix}$$

5. Порівняння альтернатив за критерієм «Вартість енергії Q3»

$$Q_3 = \begin{vmatrix} 1 & 1/2 & 7 \\ 2 & 1 & 9 \\ 1/7 & 1/9 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\bar{W}(Q_3) \frac{b_i(Q_3)}{B} = \begin{vmatrix} 1,518/4,39 \\ 2,621/4,39 \\ 0,251/4,39 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,346 \\ 0,597 \\ 0,057 \end{vmatrix}$$

6. Результуюча матриця методом середнього геометричного

$$[A] * B = \begin{vmatrix} 0,091 & 0,474 & 0,346 \\ 0,091 & 0,474 & 0,597 \\ 0,818 & 0,053 & 0,057 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 0,194 \\ 0,063 \\ 0,743 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,305 \\ 0,491 \\ 0,204 \end{vmatrix}$$

7. Оцінка узгодженості думки експерта

Для визначення ступеня неузгодженості використовують положення наступних теорем:

Теорема 1. (Фробеніуса–Перона). Нехай A - квадратна матриця зі суворо додатними дійсними елементами. Тоді справедливі твердження:

- 1) найбільше за модулем власне значення λ_{\max} є дійсним і суворо додатним;
- 2) це власне значення є простим коренем характеристичного багаточлена;
- 3) власний вектор, що відповідає λ_{\max} має суворо додатні координати;
- 4) власне значення λ_{\max} задовольняє нерівностям

$$\min_i \sum_j a_{ij} \leq \lambda_{\max} \leq \max_j \sum_i a_{ij}, \quad i, j = 1(1)n$$

Теорема 2. В додатній зворотносиметричній квадратній матриці $\lambda_{\max} \geq n$, де n – розмірність матриці.

Теорема 3. Додатна зворотно-симетрична квадратна матриця A узгоджена тоді і тільки тоді, коли $\lambda_{\max} = n$, де n – розмірність матриці.

Відповідно, індекс узгодженості (ІУ) думок експерта обраховується на підставі відхилення λ_{max} від n (чим ближчі ці числа, тим більш узгоджений результат).

$$IY = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Однак для оцінки наскільки узгоджена (або неузгоджена) думка експерта цих даних недостатньо і тому вдаються до порівняльної оцінки з індексом узгодженості матриці тієї ж розмірності, заповненої випадковими числами зі шкали парних порівнянь – індексом випадкової узгодженості (ІВУ). Наведемо таблицю індексів випадкової узгодженості для матриць розмірністю від 1x1 до 15x15. Ця таблиця (таблиця 1) була розрахована на основі 100 експериментів заповнення матриць відповідної розмірності.

Таблиця 1

Середні значення індексу випадкової узгодженості (ІВУ)

n	ІВУ	n	ІВУ	n	ІВУ
1	0.00	6	1.24	11	1.51
2	0.00	7	1.32	12	1.48
3	0.58	8	1.41	13	1.56
4	0.90	9	1.45	14	1.57
5	1.12	10	1.49	15	1.59

Оцінка узгодженості (ОУ) розраховується за наступною формулою:

$$OU = \frac{IY}{IBU}$$

Значення оцінки узгодженості менше 0,1 (10%) вважається прийнятним. Іноді допускається значення оцінки узгодженості порядку 0,2. За більшого значення оцінки потрібен перегляд парних порівнянь експерта.

Для визначення максимального власного числа матриці λ_{max} можна скористатися одним з онлайн-сервісів математичних розрахунків [4]. Зазвичай в таких сервісах/пакетах результати містять знаходження всіх власних чисел та відповідних їм власних векторів. Результати для матриць Q, Q1÷Q3 наведені в таблиці (таблиця 2).

Таблиця 2

Оцінка узгодженості думки експерта

Матриця	Q	Q1	Q2	Q3
n	3	3	3	3
λ_{max}	3,071	3	3	3,022
IY	0,036	0	0	0,011
IBU	0,58	0,58	0,58	0,58
$OU = \frac{IY}{IBU}$	0,061	0	0	0,019

Для матриць Q1÷Q3 оцінка узгодженості (ОУ) думки експерта значно нижча 0,1, так само і матриця Q – значно нижча 0,1, тому можна вважати думку експерта узгодженою.

8. Оцінка узгодженості ієрархії (ОУІ)

$$OUI = \frac{IUI}{IBUI}$$

Де ОУІ - індекс узгодженості ієрархії, ІВУІ - індекс випадкової узгодженості ієрархії.

$$IUI = IY(Q) + W_i(Q)^T * IBU(Q_i), \quad i = \overline{1, n}$$

де $IBU(Q)$ – індекс випадкової узгодженості матриці парних порівнянь важливості критеріїв; $W_i(Q)^T$ – вагові коефіцієнти важливості критеріїв; $IBU(Q_i)$ – вектор індексів випадкової узгодженості матриць парних порівнянь за критеріями.

$$IU = 0,036 + (0,173; 0,055; 0,772) * \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,011 \end{vmatrix} = 0,036 + 0,008 = 0,044$$

$$IBU = 0,58 + (0,173; 0,055; 0,772) * \begin{vmatrix} 0,58 \\ 0,58 \\ 0,58 \end{vmatrix} = 0,58 + 0,58 = 1,16$$

Оцінка узгодженості ієрархії (ОУІ)

$$OU = \frac{IU}{IBU} = \frac{0,044}{1,16} = 0,038$$

Дана оцінка ($OU = 0,038 < 0,1$) свідчить про узгодженість всієї ієрархії.

Оскільки ієрархія узгоджена, можна використовувати результати оцінки джерел. В п.6, маємо результуючу матрицю, яка вказує, що при заданих умовах маємо наступні значення: фотобатарей відповідає значення - 0,305, вітрогенератору – 0,491, дизельному генератору – 0,204. Тобто при заданих умовах найкраще використовувати вітрогенератор, оскільки значення найбільше.

Даний метод дозволяє обчислювати в реальному часі будь-яку кількість джерел живлення, підключених до однієї системи, завдяки інтеграції з комп'ютерними системами управління. Такі системи базуються на розподілених мережевих архітектурах, що забезпечують зв'язок між сенсорами, контролерами та центральним сервером. Використання інформаційних систем дозволяє аналізувати дані про погодні умови, стан обладнання та енергетичні витрати, що сприяє оперативному прийняттю рішень. Наприклад, у разі зниження ефективності вітрогенератора через відсутність вітру, система автоматично перемикається на дизельний генератор або акумулятори, керуючись алгоритмами, реалізованими в програмному забезпеченні. Кількість цих критеріїв можна змінювати в залежності від потреби, це буде впливати лише на розмірність матриці, але для комп'ютерних систем такі розрахунки не є складними, та дозволяє швидко отримати результат.

6. Висновки. В роботі було застосовано метод аналізу ієрархій для вибору оптимального альтернативного джерела живлення на об'єктах транспортної інфраструктури. Проведено багатокритеріальну оцінку варіантів із врахуванням погодних умов, екологічності та вартості енергії. За результатами аналізу отримано наступні вагові коефіцієнти для альтернатив: фотобатарея – 0,305, вітрогенератор – 0,491, дизельний генератор – 0,204. Найвищий рейтинг отримав вітрогенератор, що свідчить про його доцільність у заданих умовах експлуатації.

Розрахунок узгодженості експертних оцінок показав, що індекс узгодженості (ОУ) для основної матриці критеріїв становить 0,061, що значно менше допустимого рівня 0,1, що підтверджує надійність отриманих результатів. Для парних порівнянь альтернатив за критеріями узгодженість також знаходиться в межах прийнятних значень.

Запропонована методика може бути впроваджена в автоматизовані системи управління енергопостачанням, які базуються на комп'ютерних мережах та хмарних технологіях. Це дозволить централізовано керувати енергетичними ресурсами транспортної інфраструктури, забезпечуючи їхню взаємодію з інформаційними системами моніторингу та прогнозування. Подальші дослідження можуть включати розробку машинного навчання для прогнозування енергетичних потреб або використання блокчейн-технологій для забезпечення безпеки даних у мережах енергорозподілу, а також можуть бути спрямовані на розширення моделі шляхом включення нових критеріїв оцінки, таких як термін експлуатації обладнання, витрати на технічне обслуговування та рівень викидів CO₂. Обраний метод дає достатню точність, також

є достатньо простим, що дає змогу оперативно обраховувати значення, за допомогою обчислювальних систем, та вчасно зробити переключення джерела живлення.

Список використаної літератури

1. Федорук М. І. Багатокритеріальна оцінка ефективності інвестування в енергозбереження методом аналізу ієрархій. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*, 2018. 2(82), с. 323-334.
2. Мельничук, Г. В. (2019). Енергоменеджмент населених пунктів та територій на основі інтелектуальних систем керування електроживленням. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2019. № 4., С.88-98 . <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/7749895a-0b96-4c10-884f-6b9ea616e702/content>
3. Паламар А. М. Функціональна схема інтелектуальної системи моніторингу джерел безперебійного живлення. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти, Рівне*. 2020. С. 141–143
4. The International Energy Agency, Renewables 2024 URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/17033b62-07a5-4144-8dd0-651cdb6caa24/Renewables2024.pdf>
5. Т. С. Ладогубець, Я. О. Ромашкевич, О. Д. Фіногенов. *Методи оптимізації та прийняття рішень [Електронний ресурс]: лаб. практикум: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Інженерія програмного забезпечення інформаційних систем» спец. 121 Інженерія програмного забезпечення / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2-ге вид., переробл. та допов. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 90 с.*
6. Saaty, Thomas L. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process* (1994). Pittsburgh: RWS. ISBN 0-9620317-6-3. «A thorough exposition of the theoretical aspects of AHP.» 527 pages
7. Електронна обчислювальна система URL: <http://www.wolframalpha.com>.
8. Річард Кох *Принцип 80/20. Секрет досягнення більшого за менших витрат.* //, Видавнича група КМ-Букс, 2022 - 400 с.
9. Леснік С.В., Хижняк Т.А. *Застосування методу лінійної згортки для вибору джерела альтернативної енергії. Електроніка і зв'язок*. 2013, Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського
10. Radian Belu. *Smart Grid Fundamentals. Energy Generation, Transmission and Distribution.* // CRC Press, 2022 – 486 p.
11. Бондарчук А. П., Складанний П. М., Жебка В. В., Стражніков А. А. *Оптимізація системи зарядки електромобілів на основі методів дослідження операцій. Телекомунікаційні та інформаційні технології*, 2024. № 3, с. 86-93.
12. О. Б. Васильєв, Н. С. Васильєва, О. Д. Кічмаренко *Методи розв'язування задач багатокритеріальної оптимізації Методичні вказівки та завдання до самостійної роботи для студентів IV курсу денної форми навчання напрямів підготовки 6.040301 Прикладна математика та 6.040201 Математика. Одеса: Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, 2017. — 48 с.*