

ЛЯШЕНКО В. М., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту)

ЯЦЬКО С. І., канд. техн. наук (Український державний університет залізничного транспорту)

ПЛАХТІЙ О. А., канд. техн. наук (Український державний університет залізничного транспорту)

## Досвід застосування mcda при виборі заходів з енергозбереження на рейковому електричному транспорті

*Анотація.* У статті розглядається та аналізується досвід застосування методу багатокритеріального аналізу рішень (MCDA) для вибору заходів зі зниження енерговитрат на рейковому електротранспорті з постійно-періодичним режимом тяги, такому як метрополітен, трамвай та приміські електропоїзди. Метою дослідження було визначення оптимальних заходів з енергозбереження для міських рейкових транспортних систем в Україні за допомогою групової експертної оцінки. У процесі дослідження було проведено анкетування дев'яти експертів для вибору найбільш ефективних підходів до зниження витрат електричної енергії на рух поїздів. Запропоновані заходи оцінювалися за шістьма критеріями: енергозбереження, вартість, вплив на довкілля, технологічність, надійність, безпека для пасажирів та персоналу. У статті докладно описана методологія дослідження та склад експертної групи. Дослідження спрямоване на визначення пріоритетів у впровадженні різних категорій заходів та формування стратегії зменшення енерговитрат на підприємствах рейкового електричного транспорту в Україні.

*Ключові слова:* прийняття рішень, експертне оцінювання, заходи з енергозбереження, збалансований транспорт, рейковий електричний транспорт, метрополітен, трамвай.

### Вступ.

Системи рейкового транспорту, такі як електропоїзди приміського сполучення, метро і трамваї, є важливими компонентами транспортної інфраструктури. Однак вони споживають значну кількість енергії, що призводить до збільшення експлуатаційних витрат. Тому визначення та впровадження економічно ефективних і перспективних рішень для енергозбереження в цих системах має вирішальне значення для сталого розвитку транспорту.

Наразі існують різні заходи з енергозбереження для електричного транспорту різного характеру, такі як: ефективне використання набутої енергії потягу для тяги; енергоефективні допоміжні системи та системи забезпечення комфорту пасажирів; організаційні заходи. Однак вибір найбільш перспективних та економічно ефективних заходів може бути непростим завданням, враховуючи складну та взаємозалежну природу складових транспортних систем.

Методи групової експертної оцінки, такі як аналіз режимів і наслідків відмов (*Failure Mode and Effect Analysis*, FMEA) і багатокритеріальний аналіз рішень (MCDA), все частіше використовуються в різних сферах для сприяння ефективному прийняттю рішень.

Дослідження буде зосереджене на економічній ефективності та перспективності визначених заходів з точки зору енергозбереження, з урахуванням думок експертів, різних критеріїв оцінки та різних підходів до аналізу результатів експертного оцінювання – з повним та частковим урахуванням критеріїв в залежності від можливих пріоритетів та обмежень, що можуть стояти перед транспортним підприємством.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Питання енергоефективності завжди було актуальним для залізничного транспорту через його великі обсяги споживання енергоресурсів. Багато уваги, наприклад, у роботах [1-5], було приділено проблемі витрат енергії на рейковому електричному транспорті, зокрема шляхом оптимізації траєкторії руху поїздів («стратегії керування»).

Відомі наукові дослідження, що описують досвід використання групового експертного оцінювання для вирішення транспортних проблем шляхом вибору певних заходів з певного переліку можливих варіантів. Для цього використовуються Дельфійський метод [6] або методи багатокритеріального аналізу рішень [7, 8]. Цікавим слід визнати досвід роботи [9], в якій розглядалося питання вибору обмеженої кількості найбільш ефективних заходів з багатьох можливих за допомогою багатокритеріального аналізу рішень з залученням громадськості у якості експертів та зацікавлених осіб.

В той же час, проблемі використання формалізованих методів прийняття рішень, зокрема для формування коротко- та довгострокових сталих та ефективних стратегій розвитку транспортних підприємств приділено недостатньо уваги. Велике різноманіття факторів, що впливають на енергетичну ефективність транспортних перевезень, значно ускладнюють прогнозування та прийняття рішень керівниками підприємств та їх структурних підрозділів.

#### **Визначення мети та завдання дослідження.**

Актуальність дослідження визначається необхідністю розробки та впровадження ефективних заходів для зменшення витрат електроенергії на рейковому електротранспорті в умовах зростання цін на енергоносії. Рейковий транспорт традиційно належить до енергоємних галузей, що зумовлено специфікою його функціонування та обсягом транспортної роботи, що виконується. Оптимізація енергоспоживання на підприємствах рейкового електричного транспорту є важливим завданням для забезпечення їх конкурентоспроможності та сталого розвитку. Вибір оптимальних рішень ускладнений мультифакторністю задачі та відсутністю універсальних рекомендацій.

Метою даного дослідження є визначення пріоритетності різних категорій заходів для зниження енергоспоживання на пасажирському електричному транспорті з постійно-періодичним режимом тяги, такому як метрополітен, трамвай та приміські електропоїзди.

В даній роботі будуть стисло оглянуті методи прийняття рішень за допомогою групового експертного оцінювання та загальні питання його проведення, а також буде описана процедура формування множини потенційних заходів з енергозбереження на рейковому електричному транспорті, вибору найбільш ефективних заходів за допомогою методу MCDA та аналізу отриманих результатів.

Результати дослідження нададуть інформацію про найбільш перспективні та економічно ефективні заходи з енергозбереження для систем громадського залізничного транспорту. Таким чином, вони можуть слугувати базовою стратегією-фреймворком для прийняття обґрунтованих управлінських та інвестиційних рішень щодо поетапного впровадження найбільш ефективних заходів для комплексного

зменшення питомих витрат електроенергії на пасажирські перевезення та оптимізації енергоспоживання на підприємствах рейкового електричного транспорту. Це особливо актуально в контексті інтересу до сталих та ефективних практик енергоспоживання, що сприятиме загальній сталості та життєздатності транспортного сектору України.

#### **Виклад основної частини матеріалу.**

Організації будь-яких типів стикаються з низкою ризиків та проблем, які можуть впливати на досягнення їхніх цілей [10]. Для вирішення актуальних проблем організацій, зокрема транспортних підприємств, та для підтримки сталого їх розвитку важливо правильно оцінювати виклики, що виникають у процесі діяльності та розвитку, та розробляти ефективні стратегії. Ефективність прийнятої та реалізованої стратегії, загалом, залежить від вибору найбільш результативних рішень в рамках певних обмежень [11]. Результативність рішення можна оцінити за витратами певних ресурсів – матеріальних, трудових, фінансових, часу – для досягнення поставленої мети.

#### **1. Загальні міркування щодо прийняття рішень методом експертного оцінювання**

Ефективне прийняття рішень має важливе значення для досягнення організаціями своїх цілей та збереження конкурентоспроможності у своїй галузі. Приймаючи обґрунтовані стратегічні рішення, компанії можуть мінімізувати ризики та максимізувати користь від наявних можливостей. Одним з емпіричних законів, який підкреслює необхідність аналізу та прийняття рішень, є закон Парето, що також відомий під назвою «правила 80/20». Стисло його можна виразити як «20% зусиль приносять 80% ефекту». Виходячи з цього правила, можна зробити висновок, що порівняно невелика кількість правильно обраних рішень (з великої кількості доступних) пов'язані зі значною часткою можливої вигоди для організації. Важливість виявлення таких можливостей заздалегідь цілком зрозуміла.

Розроблення та прийняття певних рішень потребує залучення до розгляду питання (проблеми) знань, досвіду та в певній мірі – інтуїції фахівців. Для підвищення надійності, зменшення суб'єктивності та для «узагальнення» наявного досвіду до ухвалення рішень залучають декількох фахівців, утворюючи таким чином групове експертне оцінювання [11]. Кожна проблема прийняття рішень має три основні компоненти: особи, які приймають рішення (експерти), альтернативи рішень (варіанти) та наслідки рішень [12].

Важливо організувати процес прийняття рішення таким чином, щоб обрана альтернатива мала наслідки, що якнайповніше відповідають меті організації (підприємства). Набір альтернатив та наслідків залежить в першу чергу від об'єктивних

умов, у яких функціонує організація; вибір їх, навпаки, залежить від експертів.

Істотну роль в якості експертного оцінювання мають два основні фактори:

- якість (компетентність) сформованої експертної групи;
- правильність підбору методики експертного оцінювання.

## 2. Формування експертної групи. Методики групового експертного оцінювання

Якісно сформована експертна група повинна відповідати таким основним вимогам, як професіональна компетентність в певній галузі, уміння вирішувати творчі завдання, наукова інтуїція, наявність знань про сучасні тренди та перспективи галузі, об'єктивність тощо. Для оцінки компетентності та відбору експертів до експертної групи використовуються різні методи, які можна об'єднати в дві великі категорії: *об'єктивні*, що базуються на об'єктивних показниках (освіта, посада, стаж роботи, індекс цитування тощо), та *суб'єктивні*, що базуються на таких методах, як голосування, самооцінка або взаємна оцінка компетентності потенційних експертів.

Після відбору експертної групи вибір однієї або декількох альтернатив для досягнення поставленої мети проводиться за допомогою методів групового експертного оцінювання. До найбільш розповсюджених методів належать [11, 13]:

- разові опитування, які можуть бути як індивідуальними (анкетування, інтерв'ю), так і колективними (дискусія, мозковий штурм);
- опитування зі зваженими оцінками (метод Дельфі), яке передбачає кілька раундів анкетування, зворотного зв'язку та обговорення з метою досягнення консенсусу або зближення думок експертів;
- метод дерева рішень, що використовує візуальне представлення можливих шляхів прийняття рішень, які застосовуються для оцінки потенційних наслідків того чи іншого рішення;
- метод FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*), за якого команда експертів систематично аналізує та оцінює кожен компонент або крок у процесі для виявлення потенційних режимів відмов, їх наслідків і причин цих режимів відмов;
- MCDA (*Multiple Criteria Decision Analysis*), який передбачає створення матриці рішень, де кожна альтернатива оцінюється за кожним критерієм, присвоєння ваг критеріям для відображення їхньої відносної важливості та обчислення загального балу для кожної альтернативи.

## 3. Вибір можливих заходів щодо енергозбереження на рейковому транспорті

Питання енергозбереження на рейковому транспорті є питанням вибору однієї або декількох альтернатив з багатьох можливих. Вибір при цьому повинен відбуватися за певними критеріями, що є пріоритетними для транспортної організації, у рамках певної невизначеності. Ця невизначеність створюється не лише унікальністю специфіки кожного транспортного підприємства, так і відсутністю точної картини майбутнього – неможливістю достеменно передбачити зміни техніки та технології залізничного транспорту. Одним з найбільш розповсюджених методів для вирішення подібних проблем є метод багатокритеріального аналізу (MCDA). Це пов'язано з тим, що він дозволяє враховувати різні критерії та вимоги, такі як енергетична ефективність, вартість впровадження, рівень безпеки тощо. MCDA дозволяє поєднувати як об'єктивні числові показники, так і бальні оцінки для суб'єктивних показників. За допомогою MCDA особи, які приймають рішення, можуть систематично оцінювати різні варіанти та їх ефективність за цими критеріями, допомагаючи визначити найбільш ефективні рішення для скорочення енергоспоживання в системах рейкового електричного транспорту.

На сьогоднішній день основним підходом до енергозбереження залізниць є енергоефективна конструкція локомотивів та моторних одиниць, ефективне зменшення опору руху поїздів, а також належне утримання рухомого складу та колії. Водночас, зростання цін на енергоносії та екологічні проблеми роблять бажаними інші підходи до енергозбереження, такі як енергоефективне управління поїздами для залізниць і операторів рухомого складу, а в найближчому майбутньому - автоматизовані системи управління систем керування потягами [14]. Обране рішення повинне експлуатуватися деякий час, що загалом вимірюється роками. Цей фактор потребує приділяти істотну увагу сучасним трендам та перспективним технологіям найближчого майбутнього, ефективність та доцільність яких важко оцінити класичними методами прогнозування, такими як якісні моделі або числова екстраполяція. Обране рішення повинне не лише

відповідати умовам сучасності, але й майбутнього (*future-proof*).

Загалом, заходи з енергозбереження можна об'єднати у дві категорії – технічні та організаційні. Враховуючи специфіку транспортних систем, а саме особливості структури енерговитрат рухомого складу, технічні рішення були додатково розбиті на дві підгрупи. Таким чином, запропоновані експертам заходи для досягнення поставленої цілі були об'єднані у три групи: по-перше, заходи, що стосуються більш ефективного використання набутої потягом енергії при русі (8); по-друге, заходи, що стосуються покращення допоміжних систем електрорухомого складу, систем забезпечення комфорту пасажирів та не мають прямого відношення до руху потяга (6); по-третє, заходи організаційного характеру, що не пов'язані з конструктивними змінами у рухомому складі (3). Оцінювання експертами проводилось за шістьма критеріями:

- зменшення витрат енергії;
- вартість впровадження;
- вплив на оточуюче середовище;
- технологічність рішення;
- надійність у роботі;
- безпека для пасажирів та персоналу.

#### 4. Використання системи багатокритеріального аналізу рішень та проведення групового експертного опитування

Для відбору найбільш ефективних рішень використовувалася система багатокритеріального аналізу рішень з використанням зваженого добутку (*Weighted Product Model, WPM*). У порівнянні з методом зваженої суми (*Weighted Sum Model, WSM*) метод зваженого добутку не має деяких притаманних недоліків, які знижують гнучкість оцінювання [15].

Результат аналізу обчислюється за допомогою виразу [1]:

$$P(A_K) = \prod_{j=1}^n (a_{Kj})^{w_j} \quad (1)$$

де  $P(A_K)$  – результат оцінювання варіанту  $A_K$ ;

$a_{Kj}$  – експертна оцінка кожного варіанту за кожним критерієм;  
 $w_j$  – вага  $j$ -го критерію.

Для проведення групового експертного оцінювання за допомогою методу рекомендації була сформована експертна група з 9 фахівців. Умовно експертів було поділено на дві категорії: «практики», тобто ті, які мають безпосередній досвід у роботі на транспортних підприємствах та «теоретики», куди були включені люди, що займаються академічними дослідженнями транспортних систем. Група «практиків» складалася з трьох машиністів-інструкторів (АТ «Укрзалізниця» та КП «Харківський метрополітен»); група «теоретиків» - з представників Українського державного університету залізничного транспорту та Харківського політехнічного інституту. Для формування експертної групи був використаний гібридний метод, що поєднував у собі документальний та рекомендаційний підходи.

Багатокритеріальний аналіз рішень методом зваженого добутку проводився за допомогою анкети, у якій експертам пропонувалося виставити ваги для критеріїв у довільній шкалі, після чого оцінити кожне з потенційних рішень з енергозбереження за десятибальною шкалою (від 1 до 10). Оцінка кожного рішення для кожного експерта проводилася шляхом обчислення виразу [1].

Результати експертного оцінювання методом багатокритеріального аналізу наведені на рисунках 1 та 2.



Рис. 1 Загальний результат експертного оцінювання. Заходи, що стосуються більш ефективного використання набутої потягом енергії виділені синім кольором; заходи, що стосуються покращення допоміжних систем електрорухомого складу та систем забезпечення комфорту пасажирів – зеленим; заходи організаційного характеру – жовтим.



Рис. 2 Результати експертного оцінювання різними групами: групою «практиків» (помаранчевий колір) та «теоретиків» (синій)

## 5. Аналіз результатів групового експертного опитування

Результати групового експертного оцінювання показують, що за сукупністю критеріїв найбільш ефективними заходами щодо енергозбереження на транспортних підприємствах за є три заходи, що формують дещо відокремлену групу. Сюди ввійшли такі заходи, як забезпечення оптимальних режимів руху поїздів (результуючий бал  $R=6,96$ ), використання енергозберігаючого освітлення ( $R=6,72$ ) та використання рекуперативного гальмування в мережу ( $R=6,71$ ). Між позиціями №3 та №4 спостерігається помітний розрив у величині експертних оцінок. Важливо відмітити те, що експертна група дала досить низьку оцінку у контексті енергозбереження на рухомому складі з постійно-періодичним режимом тяги таким заходом, як рекуперация на накопичувачі (як бортовий, так і стаціонарний) та особливо автоведенню поїздів. Середній результуючий бал  $R$  розподіляється по групах заходів наступним чином: заходи організаційного характеру – 6,48; заходи, що стосуються покращення допоміжних систем електрорухомого складу та систем забезпечення комфорту пасажирів – 6,15; заходи, що стосуються більш ефективного використання набутої потягом енергії – 5,80.

Для поглиблення аналізу одночасно з усередненою оцінкою у кожній з двох груп експертів вираховувалося середньоквадратичне відхилення  $\sigma$  оцінки кожного з 17 запропонованих рішень. Метою введення цього кількісного показника є встановлення міри «згоди» експертів між собою щодо кожного з заходів. Невисоке значення відхилення свідчить про впевненість експертів щодо виставленої оцінки

певному заходу. Такими заходами, наприклад, є «Зниження основного опору рухові поїздів» ( $\sigma = 0,84$ ) та «Впровадження рекуперативного гальмування на стаціонарний накопичувач» ( $\sigma = 1,08$ ). Навпаки, деякі з запропонованих заходів не змогли знайти згоди до експертів щодо їх оцінки. Найбільша розбіжність думок була виявлена щодо «Впровадження автоведення поїздів» ( $\sigma = 1,9$ ) та «Використання енергоефективних тягових приводів» ( $\sigma = 1,73$ ). Дещо більша у середньому  $\sigma$  спостерігається серед групи «практиків». Якщо експертна оцінка заходу інтерпретується як його загальна ефективність та доречність, то середньоквадратичне відхилення можна інтерпретувати як міру ризику та невизначеності при його впровадженні, тобто як міру невпевненості в точності оцінки. Спираючись на це, усі перелічені заходи можна розбити на чотири групи:

- *пріоритетні* (більш ефективні з малим рівнем невизначеності);
- *доцільні* (більш ефективні з великим рівнем невизначеності);
- *можливі* (менш ефективні з малим рівнем невизначеності);
- *специфічні* (менш ефективні з великим рівнем ризику).

Для визначення приналежності кожного конкретного заходу до однієї з вищезазначених категорій було виконано порівняння його балу ефективності та міри невизначеності з відповідними медіанами обох показників. Заходи з очікуваною ефективністю вище медіанної вважаються «більш ефективними» та навпаки; аналогічним чином була ранжована міра невизначеності. Результати такої категоризації наведені на Рисунку 3.

|  |   |
|--|---|
| <p><b>Пріоритетні (<math>R &gt; 6,12, \sigma &lt; 1,47</math>)</b><br/>Більш ефективні та з малим ризиком</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Впровадження рекуперативного гальмування (в мережу);</li> <li>- Використання енергоефективних систем підзаряду батарей;</li> <li>- Покращення теплоізоляції салонів вагону;</li> <li>- Використання енергоефективної вентиляції салонів;</li> <li>- Зниження основного опору рухові поїздів.</li> </ul> | <p><b>Доцільні (<math>R &gt; 6,12, \sigma &lt; 1,47</math>)</b><br/>Менш ефективні з малим ризиком</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Зменшення простоїв потягів на зупинках;</li> <li>- Використання енергоефективних систем клімат-контролю;</li> <li>- Використання полегшених матеріалів (зниження маси тари);</li> <li>- Впровадження рекуперативного гальмування (на стаціонарній накопичувачі).</li> </ul>                                     |
| <p><b>Можливі (<math>R &gt; 6,12, \sigma &gt; 1,47</math>)</b><br/>Більш ефективні з великим ризиком</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Забезпечення оптимальних режимів ведення поїздів;</li> <li>- Використання енергозберігаючого освітлення;</li> <li>- Забезпечення оптимального наповнення поїздів.</li> </ul>   | <p><b>Специфічні (<math>R &lt; 6,12, \sigma &gt; 1,47</math>)</b><br/>Менш ефективні з великим ризиком</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Використання енергоефективних тягових приводів;</li> <li>- Впровадження рекуперативного гальмування (на бортовій накопичувачі);</li> <li>- Утилізація тепла електрообладнання для обігріву салону;</li> <li>- Впровадження прищільного гальмування;</li> <li>- Впровадження автоведення поїздів.</li> </ul> |

Рисунок 3. Категоризація заходів за їх очікуваною ефективністю та мірою невизначеності

Окремо було розглянуте актуальне питання співвідношення між капітальними витратами та очікуваним економічним ефектом (кількістю збереженої енергії). Доречним методом для визначення тісноти зв'язку між двома рядами числових значень є розрахунок коефіцієнту кореляції між ними. Для бальних оцінок капітальних витрат та енергозбереження коефіцієнт кореляції Пірсона  $\rho$  складає 0.446, що вказує на порівняно невисокий рівень зв'язку між величинами. Емпірична формула, що зв'язує обидві бальних оцінки, розрахована методом найменших квадратів, має наступний вигляд [2]:

$$S = 3,19 + 0,416 \times C \quad (2)$$

де  $S$  – очікувана бальна оцінка кількості збереженої енергії;  
 $C$  – бальна оцінка величини капітальних вкладень;

Формула [2] має невисокий коефіцієнт детермінації  $R^2=0.2$ . Враховуючи, що величина  $C$  приймає значення від 0 до 10, найбільший результат формули [2] складає 7.35; майже половина цієї величини припадає на постійний коефіцієнт, незалежний від рівня капітальних витрат. Усе вищезазначене вказує на те, що виведення певної загальної залежності очікуваної експертами енергетичної ефективності заходу від капітальних вкладень є недоцільним, а економічна ефективність кожного заходу має оцінюватися окремо. Для цього був використаний умовний показник економічної ефективності  $E$  [3]:

$$E = \frac{S}{10-C} \quad (3)$$

Результати розрахунку умовної економічної ефективності для кожного заходу наведені на діаграмі на рисунку 4.



Рисунок 4. Заходи, відсортовані за відношенням бальної оцінки енергозбереження до бальної оцінки вартості їх впровадження

Зворотну до  $E$  величину можна вважати умовним терміном окупності кожного окремого заходу. Більше значення оцінки  $E$  означає менший

термін окупності, і навпаки. Загальна залежність умовної оцінки строку окупності від умовної оцінки величини капітальних витрат наведена на рисунку 5.

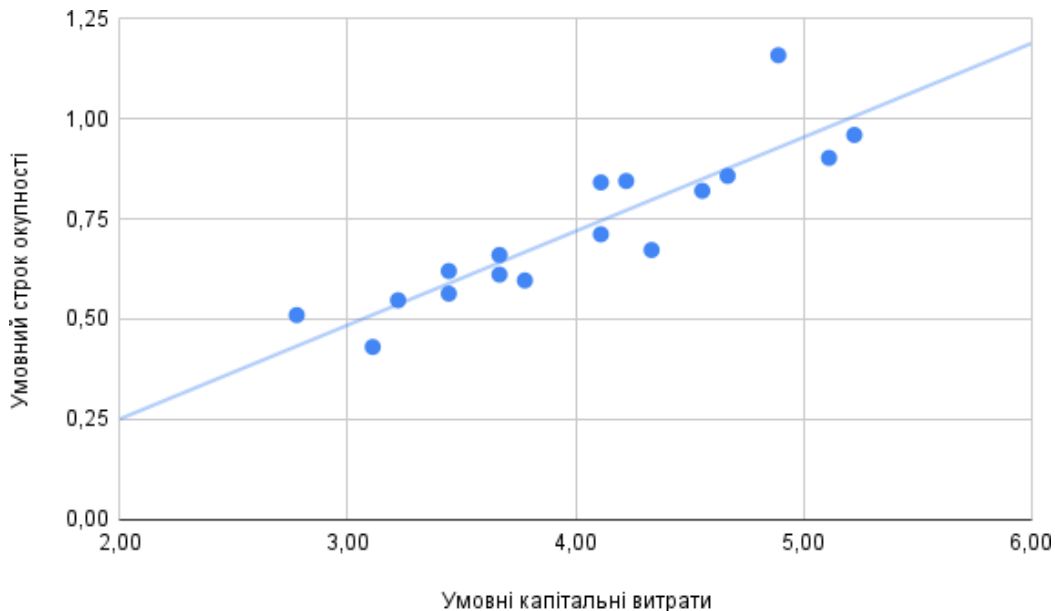


Рисунок 5. Залежність умовної оцінки строку окупності від умовної оцінки капітальних витрат

З наведених на рисунку 4 та 5 графіків можна бачити, що загалом експерти схильні вважати заходи з великими капітальними витратами як такі, що мають порівняно більший термін окупності. Також цікавим висновком з емпіричної залежності [2] є те, що менш вартісні заходи (більше значення оцінки  $C$ ) експерти вважають такими, що забезпечують порівняно вищий рівень енергозбереження (оцінки  $S$ ). У сукупності це може свідчити про наявність певних парадигм у мисленні експертів («набутого розуміння»), вироблених досвідом та практикою. «Набуте розуміння» може не зовсім точно відповідати сучасним тенденціям у розвитку технологій залізничного транспорту та перешкоджати об'єктивному оцінюванню та відбору перспективних

заходів – наприклад, переоцінювати ефективність певної групи. Тема «набутого розуміння» як фактору, що може призводити до неоптимальних рішень при експертному оцінюванні, виходить за межі даного дослідження та потребує окремої уваги.

**Висновки.**

У даному дослідженні за допомогою методу багатокритеріального аналізу рішень (MCDA) та анкетування групи експертів було визначено пріоритетність різних категорій заходів для зниження енергоспоживання на пасажирському електричному транспорті з постійно-періодичним режимом тяги, характерним для метрополітенів, приміського моторвагонного рухомого складу та інших.

Результати дослідження свідчать, що оптимальними заходами за сукупністю критеріїв, таких як: очікуваний рівень енергозбереження, вартість впровадження, технологічність, надійність та безпека як для оточуючого середовища, так і для пасажирів, на думку експертів, є забезпечення оптимальних режимів руху поїздів (тобто такої комбінації фаз прискорення, вибігу та уповільнення, що мінімізує витрати енергії), використання енергозберігаючого освітлення та використання рекуперативного гальмування в мережу. Слід відзначити, що дослідження показало неготовність експертів до довготривалих вкладень – результати аналізу свідчать, що експерти схильні вважати заходи з невисокими фінансовими витратами більш ефективними.

Спираючись на висновки експертів, можна стверджувати, що послідовна та комплексна стратегія зменшення витрат електрорухомим складом має складатися як з організаційних, так і технічних заходів, причому за умови обмежених фінансових можливостей організаційні заходи мають передувати технічним, а модернізація систем, що не пов'язані з витратами безпосередньо на тягу – модернізації власне тягових приводів та рухомого складу.

В той же час, остаточне рішення щодо вибору заходів та порядку їх впровадження лежить на уповноваженій особі – керівникові транспортного підприємства або структурного підрозділу. Дане дослідження може слугувати основою (фреймворком) для послідовної та ефективної стратегії зменшення витрат енергії на транспортних системах з постійно-періодичним режимом руху електрорухомого складу. Проведений багатокритеріальний аналіз свідчить, що помітного зменшення витрат енергії можна досягти без істотних капіталовкладень та значних змін в конструкції рухомого складу, що є особливо привабливим для транспортних підприємств.

#### Список використаних джерел

1. Донченко А. В., Сулим А. О., Сіора О. С., Мельник О. О., Федоров В. В. Аналіз питань енергозбереження та енергоефективності під час експлуатації рухомого складу метрополітену. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2016. №3. С. 108-119. DOI: 10.15802/stp2016/74732.
2. Qing Gu, Tao Tang, Yong-duan Song. A Survey on Energy-saving Operations of Railway Transportation Systems. *Measurement + Control*. 2010. №43 (7). P. 209-211. DOI: 10.1177/002029401004300704.
3. S. Yatsko, B. Sytnik, Y. Vaschenko, A. Sidorenko, B. Lyubarskyi, I. Veretennikov, M. Glebova. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. №1(9 (97)). P. 48-57. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154520.
4. S. Yatsko, A. Sidorenko, Ya. Vaschenko, B. Lyubarskyi, B. Yeritsyan. Method to Improve the Efficiency of the Traction Rolling Stock with Onboard Energy Storage. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2019. №2 (9). P. 848-858.
5. Serhiy Yatsko, Yaroslav Vaschenko, Anatoliy Sydorenko. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2019. №1 (9). P. 44-52. DOI: 10.23939/jcpee2019.01.044.
6. Alberto Romero-Ania, Lourdes Rivero Gutiérrez, María Auxiliadora De Vicente Oliva. Multiple Criteria Decision Analysis of Sustainable Urban Public Transport Systems. *Mathematics*. 2021. №9 (16), 1844. DOI: 10.3390/math9161844.
7. Rashmi Munjal, William Liu, Xuejun Li, Jairo Gutierrez, Peter Han Joo Chong. Multi-Attribute Decision Making for Energy-Efficient Public Transport Network Selection in Smart Cities. *Future Internet*. 2022. №14 (2), 42. DOI: 10.3390/fi14020042.
8. Anna Dolinayova, Vladislav Zitricky, Lenka Cerna. Decision-Making Process in the Case of Insufficient Rail Capacity. *Sustainability*. 2020. №12 (12), 5023. DOI: 10.3390/su12125023.
9. Dimitrios Nalmpantis, Anastasia Roukouni, Evangelos Genitsaris, Afroditi Stamelou, Aristotelis Naniopoulos. Evaluation of innovative ideas for Public Transport proposed by citizens using Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA). *European Transport Research Review*. 2019. №11 (22). DOI: 10.1186/s12544-019-0356-6.
10. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику. (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT). [Чинний від 2014-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. 74 с.
11. Величко О. М., Коломієць Л. В., Гордієнко Т. Б., Шевцов А. Г., Карпенко С. Р., Габер А. А. Групове експертне оцінювання та компетентність експертів. / за заг. ред. О. М. Величка. Одеса: ФОП Бондаренко М. О., 2015. 286 с.
12. Mahdi Zarghami, Ferenc Szidarovszky. Multicriteria Analysis. Application to Water and Environment Management. - Springer Berlin, Heidelberg, 2011. 159 p.
13. Stephen N. Luko. Risk Assessment Techniques. *Quality Engineering*. 2014. №26 (3). P. 379-382. DOI: 10.1080/08982112.2014.875769.
14. Rongfang Rachel Liu, Iakov Golovitcher. Energy-efficient operation of rail vehicles. *Transportation Research Part A Policy and Practice*. 2003. №37 (10). P. 917-932. DOI: 10.1016/j.tra.2003.07.001.
15. Chris Tofallis. Add or Multiply? A Tutorial on Ranking and Choosing with Multiple Criteria. *INFORMS Transactions on Education*. 2014. №14 (3). P. 103-119. DOI: 10.1287/ited.2013.0124.

#### EXPERIENCE OF APPLYING MCDA FOR ENERGY SAVING MEASURES IN RAIL ELECTRIC TRANSPORT



Postgraduate V. M. Liashenko, PhD (Tech.) S. I. Yatsko,  
PhD (Tech.) O. A. Plakhtii

Харків, Україна. E-mail:  
[a.plakhtiy1989@gmail.com](mailto:a.plakhtiy1989@gmail.com) ORCID ID:  
<https://orcid.org/0000-0002-1535-8991>

**Abstract.** The article discusses and analyses the experience of applying the multicriteria decision analysis (MCDA) method for the selection of measures to reduce energy consumption in rail electric transport with a periodic traction mode, such as the subway, tram and suburban electric trains. The aim of the study was to identify the optimal energy saving measures for urban rail transport systems in Ukraine using a group expert assessment.

In the course of the study, nine experts were surveyed to select the most effective and sustainable approaches to reducing electricity consumption for train operations. The proposed measures were evaluated according to six criteria: energy saving, cost, environmental impact, maintainability, reliability, and safety for passengers and staff. The Weighted Product Method was used to evaluate and rank the 17 potential energy saving measures proposed by the experts. The proposed energy saving measures were divided into organisational and technical, with the latter also further divided into those related to traction energy consumption and secondary measures related to comfort and life support systems.

In order to deepen the analysis, not only the data from the multicriteria evaluation itself was used, but also the agreement of experts on each specific potential solution was evaluated to identify potential high-risk options by measuring the standard deviation of the scores. A partial analysis was also conducted based on a limited number of criteria, primarily aimed at identifying the most cost-effective measures with fast recoup periods.

The study aims to prioritise the implementation of different categories of measures and develop a strategy for reducing energy consumption at rail electric transport enterprises in Ukraine, especially in the context of uncertainty and limited resources of enterprises.

**Keywords:** decision-making, expert evaluation, energy saving measures, sustainable transport, electric rail transport, metro, tram.

**Ляшенко Вадим Михайлович**, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [lyashenkovm99@gmail.com](mailto:lyashenkovm99@gmail.com). ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-1139-3537>

**Яцько Сергій Іванович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [ua.yatsko@gmail.com](mailto:ua.yatsko@gmail.com). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5977-8613>

**Плахтій Олександр Андрійович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту,

**Liashenko Vadym**, Postgraduate, Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [lyashenkovm99@gmail.com](mailto:lyashenkovm99@gmail.com). ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-1139-3537>

**Serhii Yatsko**, PhD, Associate Professor of Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [ua.yatsko@gmail.com](mailto:ua.yatsko@gmail.com). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5977-8613>

**Plakhtii Oleksandr**, PhD, Associate Professor of Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [a.plakhtiy1989@gmail.com](mailto:a.plakhtiy1989@gmail.com). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1535-8991>