

ЯЦЬКО С. І., к. т. н., доцент кафедри «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЛЯШЕНКО В. М., аспірант кафедри «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,



Холістичний підхід для ухвалення рішень щодо енергозбереження на рейковому транспорті

***Анотація.** Глобальні прагнення до сталого розвитку та енергетичної ефективності привертають значну увагу до цілеспрямованих заходів з енергозбереження в секторі залізничного транспорту. Зазвичай традиційні підходи до управління енергоспоживанням у залізничних системах є фрагментарними і зосереджені на окремих технологічних або експлуатаційних удосконаленнях ізольовано. Ці заходи мають певний успіх, але не завжди враховують складність залізничної транспортної системи в цілому. Необхідна більша комплексна стратегія, яка б ураховувала взаємопов'язану природу інфраструктури, технологій, політики та експлуатації. Для цього у статті запропоновано варіант цілісної концепції для ухвалення рішень щодо політики енергозбереження в секторі залізничного транспорту. Основна мета полягає в поліпшенні типового циклу ухвалення рішень транспортними підприємствами щодо енергозбереження. У статті проаналізовано досвід упровадження холістичних практик в інших галузях людської діяльності і досліджено, як цілісна методологія може підвищити ефективність політики і практики енергозбереження в залізничному секторі.*

***Ключові слова:** холістичний підхід, енергозбереження, залізничний транспорт, транспортне підприємство, ухвалення рішень.*

Постановка проблеми

Галузь залізничного транспорту перебуває під постійним тиском щодо необхідності скорочення споживання енергії та мінімізації впливу на навколишнє середовище. Незважаючи на зусилля щодо підвищення енергетичної ефективності, ці заходи часто спрямовані на конкретні аспекти системи, такі як удосконалення рухомого складу або зміни в експлуатації, без урахування ширшої залежності в межах залізничної мережі. Такий несистемний підхід не дає змогу повністю реалізувати наявний потенціал скорочення енергоспоживання, що призводить до неоптимальних результатів як у сфері енергетичного менеджменту, так і в досягненні цілей сталого розвитку.

Тому потрібний ширший підхід до залізничного транспорту як до взаємопов'язаної структури, що складається з підсистем. Ефективність функціонування цих підсистем відіграє важливу роль у визначенні загальної енергоефективності залізничної мережі. Однак покращення в межах окремої підсистеми навряд чи забезпечать максимальну економію енергії, якщо

вони не будуть узгоджені в рамках цілісної стратегії, що враховувала б взаємодію та взаємозалежність між ними.

Стаття спрямована на вирішення цієї проблеми, пропонуючи холістичний підхід до розроблення стратегій енергозбереження на залізничному транспорті. У роботі заплановано розробити варіант концепції, яка дала б змогу керівникам і стейкхолдерам залізничного транспорту ухвалювати обґрунтовані міжфункційні рішення, які врешті-решт призвели б до підвищення ефективності політики та практики енергозбереження в усій залізничній транспортній системі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз наявної літератури показує помітну прогалину в дослідженнях, орієнтованих на цілісний, міжфункційний підхід до енергозбереження на залізничному транспорті. Незважаючи на те, що в окремих галузях, таких як удосконалення технології рухомого складу, оптимізація експлуатації та менеджмент енергетичної інфраструктури, було проведено значну роботу з підвищення енергоефективності,

відчувається нестача комплексних досліджень, які б аналізували синергію між рішеннями, що ухвалюють у цих ізольованих підсистемах. Потрібні публікації та дослідження, які б прямо розглядали питання взаємодії підсистем залізничного транспорту одна з одною для формування інтегрованої, більш ефективної стратегії скорочення енергоспоживання.

Така неувага до цілісного підходу з енергоменеджменту на залізничному транспорті проявляється в епізодичному, часто дуже формальному підході дослідників до цієї теми. Сучасні дослідження зазвичай розглядають заходи з енергозбереження у вузькому, розрізненому контексті. Наприклад, численні роботи зосереджені виключно на оптимізації графіків і траєкторій руху поїздів [1-4] або підвищенні енергоефективності рухомого складу [5, 6], тоді як інші присвячені технічним аспектам енергетичної інфраструктури, таким як інтеграція «розумних» мереж або систем рекуперативного гальмування. Ці зусилля, хоч і цінні самі по собі, не завжди враховують ширшу взаємодію на рівні системи, яка могла б забезпечити додаткові заощадження енергії завдяки міжфункційній залежності підсистем залізничного транспорту.

Схожа тенденція спостерігається і в інших галузях, де певною мірою фрагментарний характер досліджень у сфері енергоменеджменту часто не враховує переваги більш інтегрованого підходу. Проте в цих дисциплінах спостерігають поступовий зсув у бік визнання цінності цілісних стратегій. Наприклад, у сфері міських енергетичних систем дослідники почали застосовувати системне мислення, щоб інтегрувати транспорт, використання енергії в будівлях і виробництво відновлюваної енергії в єдину концепцію [7, 8]. Ці дослідження підкреслюють зростаюче визнання необхідності комплексного підходу до енергоменеджменту в складних системах.

Питанню практичної інтеграції цілісних підходів для ухвалення рішень на транспортних підприємствах приділено недостатньо уваги. Ураховуючи успіх холистичних практик в інших галузях, можна стверджувати, що їхня інтеграція в енергетичну політику залізниць може дати значні переваги. Розглядаючи залізничну систему як мережу взаємозалежних підсистем, особи, які ухвалюють рішення, можуть дослідити можливі синергетичні ефекти, які в іншому випадку залишаються невиявленими за ізольованого аналізу. Застосування такого комплексного підходу, підкріпленого надійною системою ухвалення рішень, може значно підвищити ефективність стратегій енергозбереження в секторі залізничного транспорту.

Постановка завдання. Ця стаття має на меті розглянути залізничну транспортну систему

через призму холистичного підходу, згрупувавши низку її складових у три основні підсистеми: рухомий склад, експлуатаційні практики та енергопостачання і енергоменеджмент. Шляхом аналізу досліджень у сфері енергозбереження на залізничному транспорті, що використовують синергію між підсистемами залізниці, у статті здійснено спробу покращити цикл ухвалення рішень на транспортних підприємствах у контексті формування політик енергозбереження. Завдання полягає в тому, щоб визначити, як цілісне бачення залізниці як системи може максимізувати її енергетичну ефективність, виходячи за рамки ізольованих заходів з енергозбереження, і розробити фреймворк ухвалення рішень для сталого управління енергоспоживанням на залізниці.

Виклад основної частини матеріалу.

Проблема досягнення оптимального енергозбереження на залізничному транспорті є складною через багатогранність і залежність його підсистем одна від одної. Такі ключові елементи, як енергопостачання, енергоменеджмент, рухомий склад і його експлуатація, не є ізольованими, а функціонують у динамічному та взаємопов'язаному середовищі. Цей зв'язок значно ускладнює формування оптимальної політики енергозбереження. Більшість стратегій енергозбереження зазвичай зосереджені на локальних покращеннях у межах окремих систем, а не на взаємодії між цими компонентами. Це може призводити до неоптимальних результатів. Наприклад, рекуперативне гальмування, оптимальні траєкторії руху та розумне управління енергоспоживанням («smart grid») зазвичай розглядають окремо. Відсутність інтеграції заважає цим стратегіям повністю реалізувати свій потенціал. У той же час комплексний підхід, що включає складання графіків руху з урахуванням оптимальних траєкторій руху, дає змогу значно знизити споживання енергії в системах залізничного транспорту. Цей метод збалансовує тягову енергію та енергію рекуперативної, що було б неможливо без урахування загальносистемних взаємодій [9]. Такі стратегії, як синхронізований графік руху поїздів із використанням їхнього рекуперативного гальмування, є іншим прикладом дієвого використання цілісного підходу до енергозбереження [10]. Отже, цілісний підхід до енергозбереження на залізничному транспорті пом'якшує проблему субоптимальних стратегій, ураховуючи всю мережу взаємодій між різними підсистемами.

Будь-який технічний об'єкт є складовою іншої системи, яка у свою чергу є складовою більш масштабної надсистеми [11]. Залізничний транспорт у цьому не є виключенням. Для розроблення ефективної стратегії енергозбереження на залізничному транспорті

необхідно поділити залізничну систему на окремі підсистеми. Такий поділ дає змогу детально проаналізувати зв'язки і залежності між компонентами, що є важливим для розуміння того, як зміни в одній підсистемі впливають на інші. Однак спосіб, у який здійснюють цей поділ, може суттєво відрізнятися залежно від специфічних характеристик кожного транспортного підприємства та рівня деталізації, якого бажають досягти в аналізі.

Як наслідок, не існує та не може існувати одного стандартного або універсального способу поділу цих систем на компоненти. Наприклад, транспортне підприємство може вирішити застосувати агрегований підхід, згрупувавши системи в широкі категорії, або ж вибрати більш детальний, гранульований аналіз, поділивши підсистеми на найдрібніші компоненти. Гнучкість у поділі необхідна для того, щоб адаптувати стратегії енергозбереження до конкретних потреб та особливостей діяльності кожного окремого підприємства. Зі збільшенням кількості підсистем зростає і кількість взаємодій між ними. Складність зростає не просто лінійно, а експоненційно, оскільки кожна підсистема потенційно взаємодіє з кожною іншою підсистемою в безліч способів. Це призводить до комбінаторного вибуху факторів, які необхідно враховувати, що ускладнює управління, оптимізацію та розуміння системи в цілому. Взаємозалежності та взаємодії стають настільки численними, що аналізувати та оптимізувати кожну підсистему ізольовано, ураховуючи всі можливі взаємодії, стає непрактичним. Найбільш загальним способом поділу залізничного транспорту як системи в контексті енергозбереження можна вважати поділ його на такі три основні підсистеми:

- *рухомий склад* – усі складові самого рухомого складу, такі як поїзди, вагони та локомотиви. У цій категорії аналізують такі фактори, як керування тягою, гальмівні системи та енергетичний баланс у межах складу;
- *експлуатаційні практики* – процедури та підходи, використовувані для складання розкладу руху поїздів, практики керування та обслуговування;
- *постачання та менеджмент енергії* – інфраструктура для розподілу енергії, мережі електропостачання, накопичувачі енергії та системи управління.

Взаємодію між цими підсистемами можна ефективно подати як діаграму Венна (рис. 1). Ця візуалізація підкреслює області перекриття, де кілька підсистем взаємодіють і впливають одна на одну.



Рис. 1. Діаграма Венна холистичного підходу до енергетичної ефективності на підприємстві залізничного транспорту

За експоненційного зростання складності визначення оптимальної структури підсистем має вирішальне значення. Оптимальна структура є певним компромісом між потребою в детальному аналізі та власною складністю. Холистичний підхід для розроблення політики енергозбереження означає, що поле ухвалення рішень на діаграмі Венна знаходиться в межах перекриття областей, а не в самих областях.

Взаємопов'язаний характер сучасних залізничних технологій означає, що досягнення в одній сфері можуть безпосередньо впливати на інші, що може істотно підвищити загальну ефективність системи. Прикладом є використання рекуперативного гальмування на рухомому складі, що неможливе без відповідної адаптації систем постачання електроенергії. Розвиток систем накопичення енергії, які є двонаправленими елементами (тобто залежно від обставин виконують роль як постачальника, так і споживача електричної енергії), відкрив нові можливості для використання рекуперативного гальмування. Накопичувачі енергії на електрифікованих залізницях значно покращують використання енергії рекуперативного гальмування, що призводить до значних переваг для перевезень і майбутніх електрифікованих ліній [12-15]. Значного збереження енергії можна досягти також шляхом узгодження графіків руху за використання рекуперативного гальмування [16]. Ефект від подібної синергії двох підсистем залізниці є комплексним і не обмежений зменшенням витрат, а також має позитивні наслідки в контексті

екології та сталості залізничного транспорту. Істотних результатів можна досягти, залучаючи одночасно потенціал до покращення всіх трьох підсистем шляхом використання рекуперації, накопичувачів енергії та оптимальних графіків руху [17].

Перехід до холистичного підходу в контексті енергоменеджменту і енергозбереження неможливий без змін в алгоритмах ухвалення рішень підприємствами залізничного транспорту. Типовий цикл ухвалення управлінських рішень наведено на схемі рис. 2.

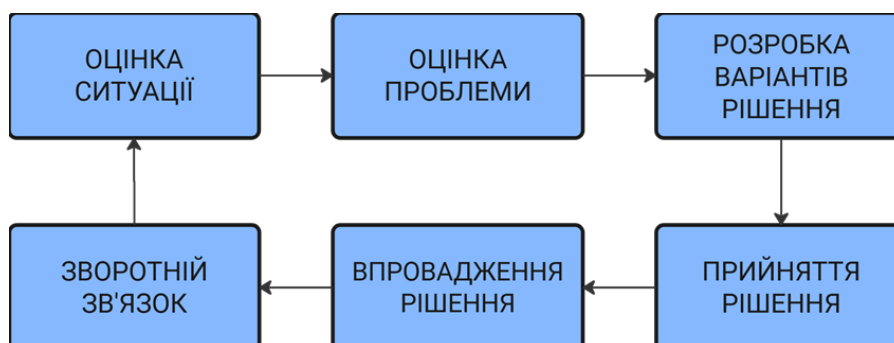


Рис. 2. Типовий цикл ухвалення управлінських рішень на транспортному підприємстві

Недоліком подібного циклу є відсутність гнучкості, необхідної для вирішення комплексних проблем системного рівня. Традиційне ухвалення рішень зазвичай зосереджене на оптимізації конкретних показників, прагнучи до короткострокових покращень або рішень, спрямованих на найнагальніші проблеми. З розробленням варіантів (альтернатив) і відбором заходів до впровадження кожен конкретну альтернативу розглядають і оцінюють окремо від інших. Критеріями відбору (очікуваний рівень збереження енергії, ціна, технологічність і т. п.) при цьому виступають показники, характерні для ізолюваного впровадження такого рішення, що спотворює уявлення про реальні можливості системи та призводить до неоптимальних стратегій впровадження заходів у системі. Прикладом спотворення поля ухвалення рішень можуть бути систематичні упередженості експертних висновків щодо певних альтернатив («набуте розуміння») із наданням пріоритету рішенням, наприклад, з невисокими капіталовкладеннями та швидким терміном окупності [18]. Однією з причин появи

подібного набутого розуміння можна вважати сприйняття альтернатив як сукупності готових рішень із відомим ефектом, який експерти можуть оцінювати як такий, що практично не змінюється від особливостей операцій конкретного транспортного підприємства. Системне мислення, за якого кожен альтернативу оцінюють у взаємодії та можливій синергії з іншими альтернативами, є менш чутливим до подібних систематичних упередженостей. Одним із прикладів інтеграції системного мислення для ухвалення рішень є метод «розділяй і володарюй» (англ. *Divide-and-conquer approach*), за якого експерти поділяють комплексну проблему на менші, більш прості в управлінні компоненти, ураховуючи при цьому, як ці частини пов'язані з загальним цілим. Цей підхід є ефективним для подолання наслідків когнітивних обмежень [19].

Можливий варіант адаптації управлінського циклу ухвалення рішень з інтеграцією холистичного підходу та урахуванням можливих упередженостей осіб, які ухвалюють рішення (рис. 3).

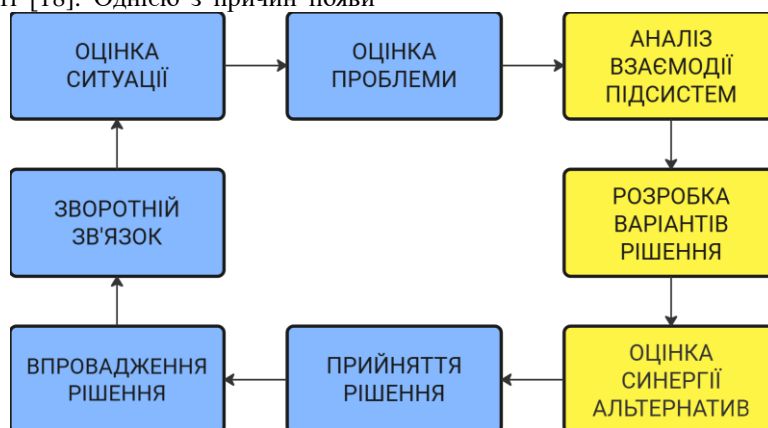


Рис. 3. Варіант циклу ухвалення рішень на транспортному підприємстві за холістичного підходу

На відміну від традиційного циклу, у ньому введений етап аналізу взаємодії підсистем, що дає змогу перейти до обґрунтованого пошуку варіантів рішень не як окремих заходів, а комбінацій таких заходів. Як наслідок, змін зазнають і критерії відбору заходів до впровадження, що потребує додаткового оцінювання сумарних ефектів від їх упровадження в умовах конкретного транспортного підприємства.

Висновки

1. Зростання цін на енергоносії та зміни в номенклатурі ринку транспортних послуг (конкуренція різних видів транспорту між собою) підтримують актуальність проблеми енергозбереження на залізничному транспорті протягом тривалого часу. Потреба в подальшому зниженні енерговитрат обумовлює необхідність переходу від уже традиційних фрагментарних підходів до цілісного (холістичного) підходу.

2. Розвиток певних технологій, таких як багатофункційні системи накопичення та зберігання енергії тощо, сприяє зростанню кількості варіантів побудови стратегій з енергозбереження і сталості підприємств рейкового транспорту. Це дає змогу переосмислити перелік вимог як до системи залізничного транспорту взагалі, так і окремих її підсистем (рухомого складу, експлуатаційних практик і системи постачання і менеджменту енергії). Оскільки традиційні підходи до енергозбереження зосереджені на окремих аспектах системи, вони не дають змогу повністю реалізувати потенціал скорочення енергоспоживання через неврахування системних взаємозв'язків. Тому ефективний підхід до енергозбереження потребує аналізу взаємодії між цими підсистемами.

3. Використання холістичного підходу для побудови стратегії з енергозбереження дає змогу виявити синергетичні ефекти між різними заходами, що може призвести до значно більшої економії енергії, ніж за ізольованого впровадження окремих рішень, а також знизити ризики від можливих впливів упереджень в експертних висновках.

4. Упровадження холістичного підходу потребує адаптації циклу ухвалення управлінських рішень, зокрема із введенням етапу аналізу взаємодії підсистем і зміни критеріїв відбору заходів до впровадження. Доцільним є ширше використання практики одночасного вибору комбінацій кількох альтернатив, які дають найбільший сумарний ефект.

Список використаних джерел

1. Shuai Su, Zhingbei Tian, Rob M. P. Goverde. *Energy-Efficient Train Operation. A System Approach for Railway Networks*. Cham: Springer, 2023. 234 с.
2. Jacyna M., Gołębiowski P. An approach to optimizing the train timetable on a railway network. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2015. № 146. С. 699-710. DOI: 10.2495/UT150571.
3. Caimi G., Kroon L., Liebchen Christian. Models for railway timetable optimization: Applicability and applications in practice. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2017. № 6. С. 285-312. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.11.002.
4. Simulation of The System of Provision of Target Braking of Rolling Stock / Vadym Liashenko, Serhii Yatsko, Yaroslav Vaschenko, Mykola Khvorost. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. Т. 28, № 2. С. 63-73. DOI: 10.18664/ikszt.v28i2.283285.
5. Ronanki D., Siddhartha A. Singh, Williamson S. Comprehensive Topological Overview of Rolling Stock Architectures and Recent Trends in Electric Railway Traction Systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2017. № 3. С. 724-738. DOI: 10.1109/TTE.2017.2703583.
6. Application of flywheel energy storage for heavy haul locomotives / M. Spiragin, P. Wolfs, F. Szanto, Y. Sun, C. Cole, Dwayne Nielsen. *Applied Energy*. 2015. № 157. С. 607-618. DOI: 10.1016/J.APENERGY.2015.02.082.
7. Smart Energy Systems for coherent 100 % renewable energy and transport solutions / B. V. Mathiesen H. Lund, D. Connolly та ін. *Applied Energy*. 2015. № 145. С. 139-154. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.075.
8. Berjawi A. E. H., Walker S. L., Patsios C. An evaluation framework for future integrated energy systems: A whole energy systems approach. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2021. № 145. DOI: 10.1016/J.RSER.2021.111163.
9. An Energy-Efficient Train Operation Approach by Integrating the Metro Timetabling and Eco-Driving / S. Su, Xuekai Wang, Yuan Cao, Jiateng Yin. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2020. № 21. С. 4252-4268. DOI:10.1109/TITS.2019.2939358.
10. A synergistic energy-efficient planning approach for urban rail transit operations / J. Ning, Yonghua Zhou, Feng-Qin Long, Xin Tao. *Energy*. 2018. № 151. С. 854-863. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2018.03.111.
11. Яцько С. І. Методологія вибору раціональної стратегії визначення характеристик перспективного моторвагонного рухомого

- складу. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. 2012. № 29. С. 182-195.
12. Ratniyomchai T., Hillmansen S., Tricoli P. Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2014. № 4. С. 9-20.
 13. Energy storage systems to exploit regenerative braking in DC railway systems: Different approaches to improve efficiency of modern high-speed trains / M. Ceraolo, G. Lutzemberger, E. Meli, L. Pugi, A. Rindi, G. Pancari. *Journal of Energy Storage*. 2018. № 16. С. 269-279.
 14. Electrical transport with onboard energy storage / Sergiy Yatsko, Yaroslav Vashchenko, Anatoliy Sidorenko, Borys Liubarskyi, Bagish Yeritsyan. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2019. Т. 9, № 2. С. 848-858. DOI: 10.20508/ijrer.v9i2.9143.g7652.
 15. Yatsko S., Vashchenko Ya., Sidorenko A. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2019. Т. 9, № 1. С. 44-51. DOI: 10.23939/jcpee2019.01.044.
 16. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction / Yatsko, S., Sytnik, B., Vashchenko, Y., Sidorenko, A., Liubarskyi, B., Veretennikov, I., & Glebova, M. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Т. 1, № 9 (97). С. 48-57. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154520.
 17. González-Gil A., Palacin R., Batty P. Sustainable urban rail systems: strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energy Conversion and Management*. 2013. № 75. С. 374-388.
 18. Ляшенко В. М., Яцько С. І., Плахтій О. А. Досвід застосування MCDA при виборі заходів з енергозбереження на рейковому електричному транспорті. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. Т. 28, № 4. С. 46-54. DOI:10.18664/ikszt.v28i4.296506.
 19. Shanteau J. Psychological characteristics and strategies of expert decision makers. *Acta Psychologica*. 1988. № 68. С. 203-215. DOI: 10.1016/0001-6918(88)90056-X.

Liashenko V., Yatsko S. A holistic approach to energy saving decision making in rail transport.

Abstract. The global trend towards sustainability and energy efficiency is drawing considerable attention to dedicated energy saving measures in the rail transport sector. Traditional approaches to managing energy consumption in railway systems are usually fragmented and focus on individual technological or operational improvements in isolation. These measures often focus on specific aspects of the system, such as rolling stock improvements or operational changes, without

considering the wider interdependencies within the railway network. As a result, this ad hoc approach cannot fully realise the potential for energy savings, leading to sub-optimal results in terms of both energy management and sustainability goals.

A more comprehensive strategy is needed that takes into account the interconnected nature of infrastructure, technology, policy and operation. This paper therefore proposes a holistic framework for decision-making on energy saving policies in the rail transport sector. The main goal is to improve the typical decision-making cycle of transport companies regarding energy saving. This article analyses the experience of implementing holistic practices in other areas of human activity and explores how a holistic methodology can improve the effectiveness of energy saving policies and practices in the railway sector.

By approaching the railway system as a network of interdependent subsystems, decision makers and stakeholders can explore possible synergies that otherwise go undetected in an isolated analysis. Application of a holistic approach therefore can lead to significantly greater energy savings than the implementation of individual solutions alone, as well as reduce the risks from the possible effects of biases in expert assessments. Adopting such an integrated approach, backed by a robust decision-making system, can significantly increase the effectiveness and sustainability of energy saving strategies in the rail transport sector.

Keywords: holistic approach, energy saving, railway transport, transport company, decision-making.

Ляшенко Вадим Михайлович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: 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. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5977-8613>.

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. 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. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5977-8613>.