

Анатолій Сидоренко¹, Сергій Яцько²¹ Старший інженер ПрАТ «ЕЛАКС», м. Харків, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-5550-6103>² Кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, майдан Фейєрбаха 7, 61050, Україна <https://orcid.org/0000-0002-5977-8613>

* Автор, відповідальний за листування: sidorenko58@gmail.com

**ОЦІНКА ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ
НА ВТРАТИ ВІД НЕРІВНОМІРНОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
ТА ЗАХОДИ ЩОДО ЇХ ЗНИЖЕННЯ**

В статті розглядається актуальна проблема нерівномірності електроспоживання на залізничному транспорті та кроки, по її зниженню. Проведений аналіз умов експлуатації тягового рухомого складу. На основі результатів проведеного аналізу надано характеристики режимам роботи тягового рухомого складу залізничного транспорту та енергетичним процесам у системі електричної тяги при їх реалізації. Наведено фактори впливу, що призводять до виникнення енергетичних втрат у результаті нерівномірності тягового електроспоживання. Запропоновано показники для оцінки нерівномірності тягового електроспоживання. Як показники пропонується використання інтегральних енергетичних показників пік-фактор та коефіцієнт форми. Пік-фактор характеризує рівень надлишкової потужності системи електропостачання, коефіцієнт форми – втрати в системі тягового електропостачання. За даними показниками було проведено оцінку часових діаграм електроспоживання на фідері тягової підстанції постійного струму залізниці та електропоїздом метрополітену. Результати кількісної оцінки підтвердили несприятливий вплив визначених факторів на нерівномірність тягового електроспоживання. Було встановлено, що режими роботи електропоїзда метрополітену провокують виникнення більш значних енергетичних втрат в елементах системи тягового електропостачання у порівнянні із залізницею. Доведено, що рекуперативне гальмування посилює нерівномірність електроспоживання, збільшуючи завантаженість тягової мережі та сприяючи виникненню струмів імпульсного характеру у системі тягового електропостачання. Запропоновано концепції з подолання проблем нерівномірності тягового електроспоживання та використання надлишкової енергії рекуперації, що ґрунтуються на використанні накопичувача енергії як додаткового джерела живлення тягового електроприводу.

Ключові слова: режим роботи, нерівномірність споживання електроенергії, втрати, пік-фактор, коефіцієнт форми, накопичувач енергії.

Вступ. На даний час залізничний транспорт відіграє значну соціальну роль в економіці України. Незважаючи на стрімкість автомобілізації, залізничний транспорт України залишається провідною галуззю в дорожньо-транспортному комплексі країни, забезпечуючи 82% вантажних і майже 50% пасажирських перевезень [1].

Серед основних пріоритетів національної транспортної стратегії України на період до 2030 р. є збереження конкурентоспроможності та підвищення ефективності транспортної системи

України [2]. При цьому зменшення транспортних витрат та збільшення ефективності транспорту виділяються як одні із основних заходів по досягненню поставлених цілей.

З загального обсягу споживаної електрифікованим залізничним транспортом електроенергії основна її частина, 80...84 %, використовується безпосередньо на тягу поїздів та складає значну частку виробничої собівартості перевезень [3, 4]. На рис. 1 наведено діаграми електроспоживання АТ «УКРЗАЛІЗНИЦЯ» за 2014-2019 рр.



Рис. 1. Споживання електроенергії АТ «УКРЗАЛІЗНИЦЯ» за 2014-2019 рр. [5]

З огляду на стратегічні цілі, що визначені Національною транспортною стратегією України на період до 2030 р., соціально-економічну роль залізничного транспорту та його енергоємність, розробка технічних засобів і технологій з використання потенціалу енергозбереження у системах тяги є першочерговою задачею задля забезпечення подальшого розвитку транспортної галузі України.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Аналіз ситуації свідчить, що, незважаючи на значний прогрес у технічних засобах електричної тяги, багато енергетичних проблем виявляються не лише невирішеними, а й навіть ускладнюються. Специфічна особливість електричного транспорту пов'язана зі значною нерівномірністю споживання електроенергії під час руху поїзда [6], а також з великими втратами електроенергії в системі тягового електропостачання. Неприятливий режим електроспоживання веде до вагомих втрат енергії в тяговій мережі, в агрегатах тягових підстанцій і в первинній мережі змінного 3-фазного струму. Складова втрат від енергії, що йде на тягу, може досягати 12% [4, 7]. Значну частку втрат проковує нерівномірність споживання енергії. Їх значення може досягати в умовах залізниці 6 % та щонайменше 8% в умовах метрополітену [4, 7, 8].

Значний потенціал енергозбереження криється у використанні рекуперативного гальмування [9-11]. За різними оцінками потенціал енергозбереження від використання рекуперативного гальмування є значним і визначається двома основними факторами: часткою енергії спожитої для подолання опору руху та ефективністю перетворення електричної енергії в механічну і навпаки. Однак складність технологічного процесу узгодження режимів роботи тягового рухомого складу в системі електричної тяги робить неможливим використання всього потенціалу енергозбереження від реалізації режиму рекуперативного гальмування [12, 13]. На сьогодні максимальна економія енергії від реалізації рекуперативного гальмування у вантажних та пасажирських міжрегіональних перевезеннях складає лише 3...12 %, а у міських та приміських пасажирських перевезеннях – 15...25 % [4, 14].

Вирішення проблем, пов'язаних з нерівномірним споживанням електроенергії електрорухомим складом і підвищення ефективності використання рекуперативного гальмування, є першочерговими. У даному напрямі ведеться значна кількість досліджень як вітчизняними, так і зарубіжними вченими. Як показує практичний досвід технічні рішення щодо вирішення даної проблематики значною мірою фінансово затратні та можуть бути економічно не обґрунтовані для тієї чи іншої області застосування.

Незважаючи на популярність даного напрямку підвищення енергоефективності систем тяги, до тепер, не повною мірою окреслено режими роботи системи тяги, що призводять до виникнення максимальних економічних збитків від нерівномірності тягового електроспоживання та залишається не до кінця розкритим питання можливих концепцій керування енергообмінними процесами у системі тяги задля її зниження. Таким чином можна стверджувати, що дана задача є актуальною на сьогодні та потребує проведення детального розгляду.

Мета та завдання дослідження – аналіз режимів роботи тягового рухомого складу, визначення характерних особливостей їх протікання та заходів щодо зниження втрат у системі тяги від нерівномірності електроспоживання.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі завдання:

- провести аналіз умов експлуатації тягового рухомого складу залізничного транспорту;
- визначити фактори, що впливають на виникнення втрат в елементах системи тяги унаслідок нерівномірності електроспоживання;
- визначити концепції керування енергообмінними процесами у системі тяги з накопичувачем енергії, що сприятимуть зменшенню нерівномірності електроспоживання.

Матеріали та методи дослідження. Система електричної тяги – це специфічна електроенергетична система з рухомими навантаженнями. Вона, як правило, характеризується значно несприятливішими значеннями показників нерівномірності електроспоживання. Інша особливість визначається застосуванням рекуперативного гальмування. Нерівномірність споживання енергії в електричній тязі має тенденцію до посилення, що погіршує її енергетичні та економічні показники, та вимагає завищення встановленої потужності всіх видів обладнання в системі електропостачання. Це пов'язано насамперед з умовами експлуатації тягового рухомого складу та необхідністю збільшення пропускної здатності.

Умови експлуатації тягового рухомого складу залізничного транспорту передбачають його роботу у трьох режимах – тяга, вибіг, гальмування. У цілому частота та тривалість реалізації режимів залежить від багатьох факторів. Визначальними факторами є довжина перегону, заданий час руху по перегону та профіль шляху.

Було проведено аналіз графіка руху поїздів міжрегіонального сполучення, що обслуговують «популярні» напрямки пасажирських перевезень по Україні [15]. Результати аналізу показали, що у 98% випадках час проходження міжстанційних ділянок більший за 15 хв., а у 58% більший за 45 хв. (рис. 2).

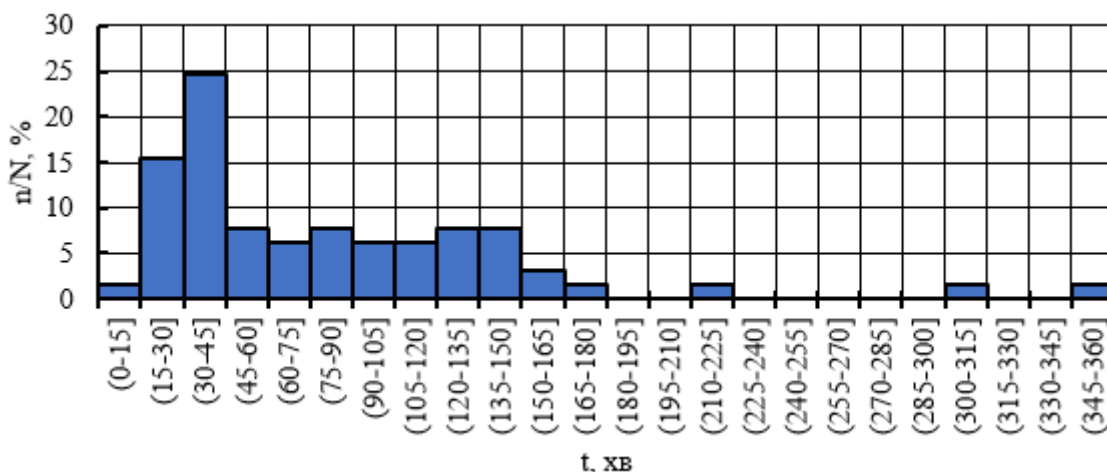


Рис. 2. Гістограма розподілення часу проходження міжстанційних ділянок на найбільш популярних маршрутах пасажирськими поїздами далекого сполучення

Також було проведено аналіз графіку руху приміських потягів по Південній залізниці [16]. У приміському сполученні для 93% випадків цей час не перевищує 15 хв. (рис. 3, а), для метрополітену 3 хв. (рис. 3, б).

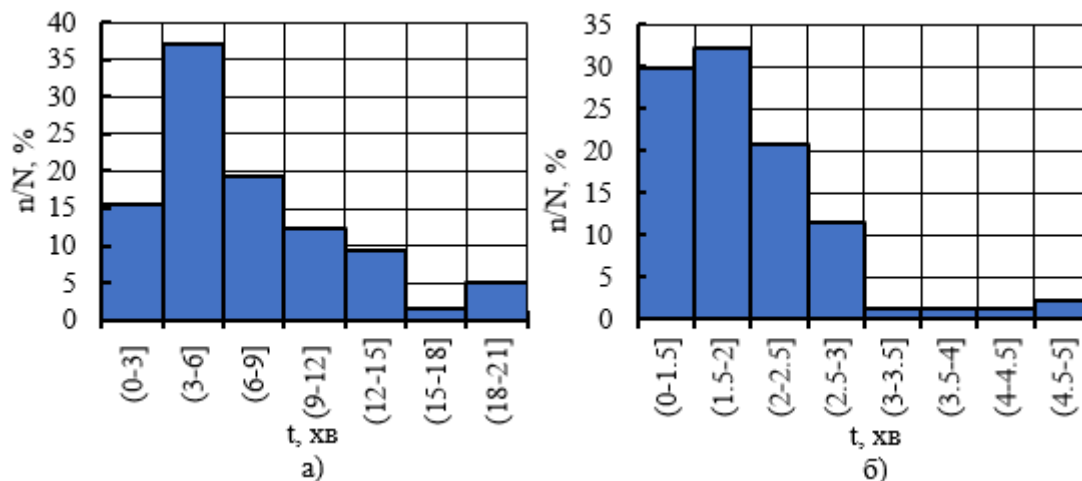


Рис. 3. Гістограма розподілення часу проходження міжстанційних ділянок поїздами: а) на Південній залізниці у приміському сполученні; б) Київський метрополітен

Такі значення часу проходження зумовлені умовами експлуатації, а саме; відстанню між зупинками та графіком руху поїздів. Так, наприклад, довжина перегонів Південної залізниці, на яких експлуатуються електропоїзди приміського сполучення у 95% випадків не перевищує 6 км (рис. 4, а). На Південно-західній – 11 км (рис. 4, б).

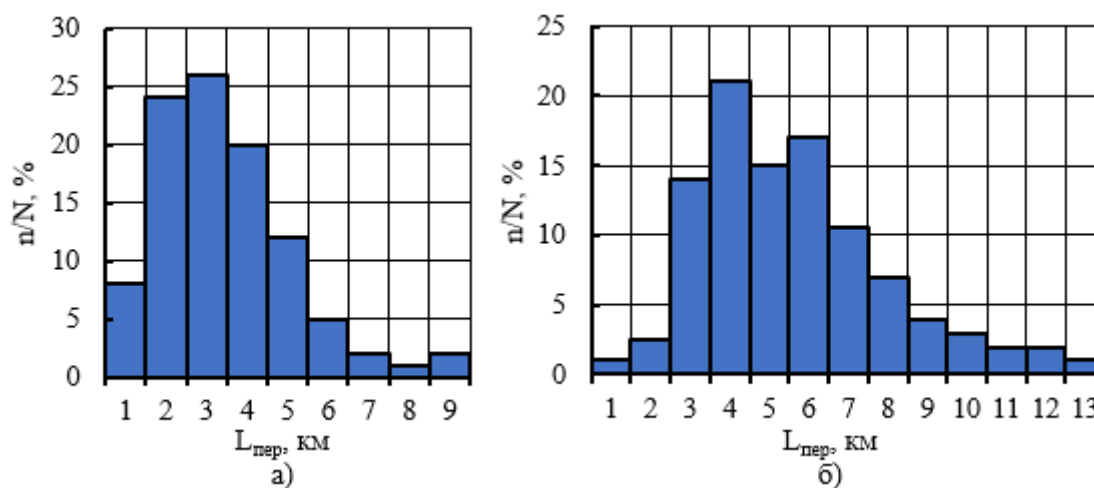


Рис. 4. Гістограми розподілення перегонів n від їх кількості N на яких експлуатуються приміські електропоїзди: а) по Південній залізниці; б) Південно-західній залізниці [17]

Найбільш несприятливим для системи електричної тяги є режим тяги, а саме: фаза розгону, оскільки вона супроводжується короткотривалим споживанням енергії пікової потужності. Згідно з наведеними статистичними даними, що найменше 1 раз кожні 15 хв., у випадку приміських пасажирських перевезень, та 3 хв., у випадку міських пасажирських перевезень метрополітенном,

тяговий рухомий склад споживає енергію пікової потужності. При цьому часовий проміжок споживання є коротким. Це викликано необхідністю забезпечення високого значення середньої швидкості руху по перегону. Середнє значення пускового прискорення, у випадку приміського сполучення становить $0,7 \text{ м/с}^2$ та 1 м/с^2 для електропоїздів метрополітену. Середнє значення уповільнення, у випадку приміського сполучення, становить $0,6 \text{ м/с}^2$ та 1 м/с^2 для електропоїздів метрополітену, а максимальна швидкість експлуатації досягає 160 та 80 км/год відповідно. Для підтримки заданої швидкості руху процес розгону поїзда на окремих перегонах може здійснюватися неодноразово. Переведення тягового рухомого складу у режим тяги для повторного розгону поїзда здійснюється у межах 15 – 25% від загальної кількості поїздів [18]. Аналіз статистичних даних тривалості режимів роботи електропоїздів ЕПЛ2Т-007 на ділянці ст. Скнилів – ст. Стрий показав, що найбільш ймовірна тривалість включення тяги, близько 70%, складає від 10 до 35 с (рис. 5).

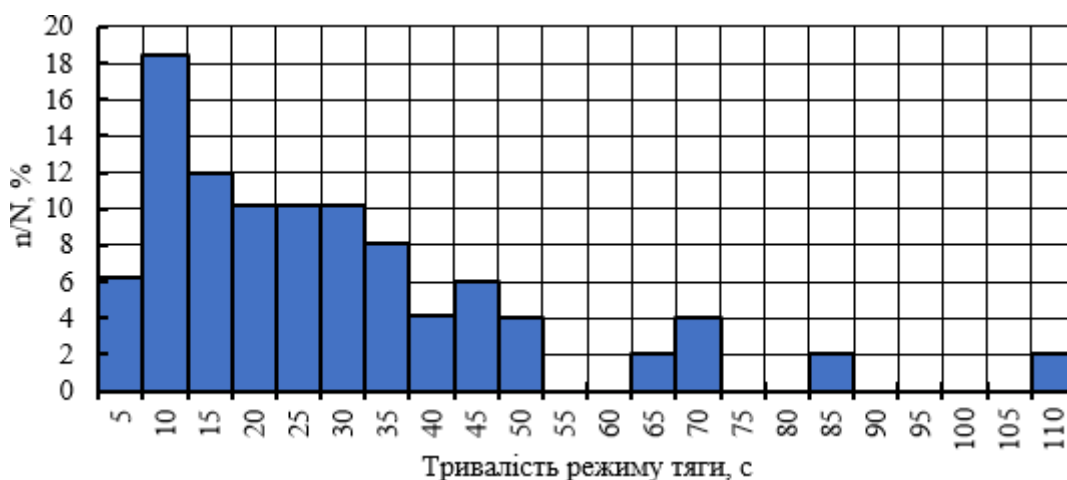


Рис. 5. Статистичний розподіл тривалості режиму тяги за одне включення [16]

Згідно з [18] тривалість режиму вибігу електропоїздів приміського сполучення займає від 30 до 80% загального часу руху по перегону. Для середньої довжини перегону 3 км цей час становить близько 65%. Що стосується вантажних перевезень графік руху поїздів розробляється таким чином, щоб мінімізувати кількість зупинок вантажних поїздів на заборонні сигнали та проміжних станціях. Таким чином вантажні перевезення супроводжуються більш рівномірним споживанням потужності з тягової мережі за конкретний період часу. Це також пов'язано з необхідністю постійного підтримання швидкості руху, що викликано значним опором руху. Отже режими роботи тягового рухомого складу міського та приміського залізничного транспорту можна охарактеризувати як повторно-короткочасні з високо інтенсивним, несталим споживанням та генеруванням енергії значної потужності. Часові проміжки споживання та генерування енергії складають десятки секунд. Для вантажних та міжрегіональних пасажирських поїздів режими роботи можна охарактеризувати як довготривалі де основний часовий інтервал циклу руху складає режим тяги та гальмування, а потужність споживання та генерування з точки зору нерівномірності електроспоживання, більш збалансовано розподілена у часі. Що стосується режиму гальмування то на сьогодні сучасні зразки тягового рухомого складу обладнуються системами рекуперативного гальмування. Рекуперативне гальмування є достатньо ефективним інструментом зменшення затрат енергії на тягу поїздів, особливо для тягових споживачів з повторно-короткочасними режимами роботи. Однак, з точки зору нерівномірності споживання, використання рекуперативного гальмування суттєво погіршує ситуацію. Це пов'язано з виникненням у тяговій мережі імпульсів зворотного

струму короткої тривалості. У зв'язку з проблемою використання енергії рекуперативного гальмування тривалість цих імпульсів струму є крайне короткою.

Отже міський та приміський електричний транспорт створює більш несприятливі режими роботи системи електропостачання, провокуючи виникнення додаткових втрат в елементах системи. На рис. 6 приведено часові діаграми тягового електроспоживання та рекуперації за один оберт електропоїзда на лінії Харківського метрополітену для двох різних дат з однаковим днем тижня та в однаковий часовий проміжок доби

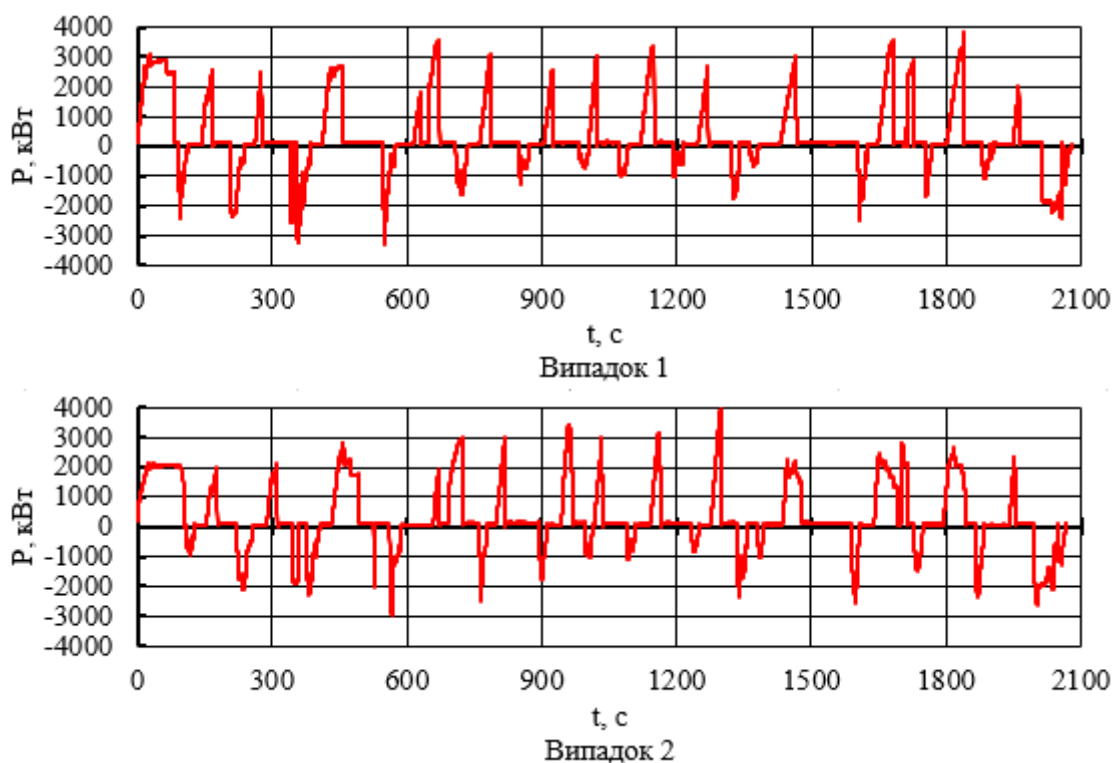


Рис. 6. Часові діаграми потужності тягового електроспоживання та енерговідновлення за один оберт електропоїзда на лінії Харківського метрополітену для двох різних дат з однаковим днем тижня та в однаковий часовий проміжок доби

На рис. 7 приведено добові діаграми електроспоживання на фідері тягової підстанції постійного струму залізниці. Діаграми побудовані на основі даних струмів та напруг фідерів тягової підстанції постійного струму залізниці, що отримані за допомогою інформаційно-діагностичного комплексу «Регіна» (дискретність вимірювання 1 с.).

Наведені часові діаграми яскраво ілюструють імпульсний характер споживання електроенергії тяговими навантаженнями. Негативні значення потужності (рис. 7) не пов'язані з рекуперацією енергії, а свідчать лише про перетікання потужності через шини тягової підстанції з інших фідерних зон. Як відомо потужність тягових підстанцій розраховується із середньо максимальних струмів споживання. Із часової діаграми (рис. 7) добре видно, що встановлена потужність тягової підстанції значно завищена в порівнянні з середньодобовою потужністю.

Моменти прибуття та відправлення електропоїздів метрополітену на станції по парному та непарному напрямку, тривалість та послідовність режимів їх роботи є взаємно неузгодженими, тобто є незалежними подіями. Таким чином ймовірним є виникнення випадку накладання

імпульсів споживання. У випадку експлуатації тягового рухомого складу з системою рекуперативного гальмування разом з цим виникає проблема надлишкової енергії рекуперації. Ці проблеми також властиві і системі електричної тяги у якій експлуатуються електропоїзди для здійснення приміських пасажирських перевезень.

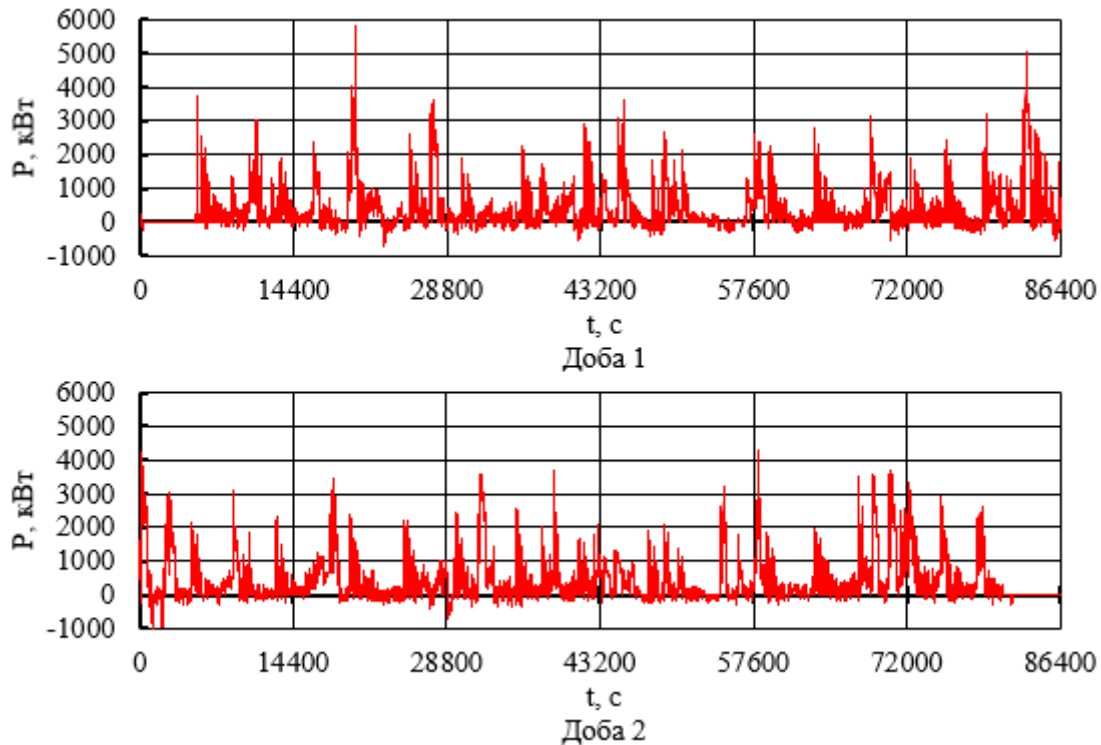


Рис. 7. Часові діаграми потужності електроспоживання на фідері тягової підстанції постійного струму

Для часових діаграм (рис. 6, 7) було проведено кількісну оцінку нерівномірності споживання енергії у даних випадках. Оцінка проводилася на основі інтегральних енергетичних показників пік-фактор (формула 1) та коефіцієнт форми (формула 2). Пік фактор являє собою відношення максимальної потужності споживання до її середнього значення за період усереднення:

$$\Pi = \frac{P_{max}}{P_{cp}} = \frac{P_{max}}{\frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt}, \quad (1)$$

T – період усереднення;

P_{max} – максимальна потужність за період T ;

P_{cp} – середнє значення потужності за період T ;

$P(t)$ – миттєва потужність;

Коефіцієнт форми являє собою відношення діючого значення потужності за період усереднення до її середнього значення:

$$K_{\phi} = \frac{P_{\phi}}{P_{cp}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt}, \quad (2)$$

T – період усереднення;

P_{cp} – середнє значення потужності за період T ;

$P(t)$ – миттєва потужність;

P_{ϕ} – діюче значення потужності за період T .

Втрати у системі електропостачання можна вважати пропорційними квадрату коефіцієнта форми. Період усереднення має відповідати характерним періодам графіку руху.

Дані інтегральні показники дозволяють оцінити позитивний ефект від запровадження технічних рішень щодо керування процесами енергообміну у системах електричної тяги. Вони характеризують такі критерії:

Пік-фактор – надлишкова потужність системи електропостачання;

Коефіцієнт форми – втрати в системі тягового електропостачання.

У таблиці 1 приведено результати кількісної оцінки нерівномірності тягового електроспоживання для представлених раніше діаграм електроспоживання (рис. 6, 7).

Таблиця 1. Результати кількісної оцінки нерівномірності тягового електроспоживання

Інтегральний енергетичний показник	Рисунок 6				Рисунок 7	
	Випадок 1		Випадок 2		Доба 1	Доба 2
	З рек. гальм.	Без рек. гальм.	З рек. гальм.	Без рек. гальм.		
Пік-фактор	13,05	7,82	12,75	7,57	16,84	10,54
Коефіцієнт форми	3,92	2,06	3,65	1,88	2,01	1,94

Для метрополітену період усереднення відповідав часу одного оберту електропоїзду. Для тягової підстанції період усереднення був рівний одній добі. Суттєву розбіжність показників пік-фактора для часових графіків електроспоживання з фідера тягової підстанції можна пояснити зміною інтенсивності завантаження цієї фідерної зони протягом двох діб. Також була проведена оцінка за різних технічних реалізацій режимів гальмування електропоїздом метрополітену – з використанням рекуперативного гальмування (рис. 7) та при перетворенні енергії гальмування у теплову (від’ємні значення потужності на часових діаграмах не враховуються при проведенні розрахунку інтегральних енергетичних показників). З отриманих результатів можна зробити висновок, що рекуперативне гальмування посилює нерівномірність електроспоживання, збільшуючи завантаженість тягової мережі та сприяє виникненню струмів імпульсного характеру в силових агрегатах тягової підстанції та системи зовнішнього електропостачання унаслідок неузгодженості режимів роботи тягових навантажень. З енергетичної точки транзит енергії рекуперації по тяговій мережі призводить до виникнення непродуктивних втрат в елементах тягової мережі та її додаткової завантаженості.

На сьогодні одним з основних інструментів для подолання проблем нерівномірності електроспоживання та використання надлишкової енергії рекуперації є інтеграції накопичувачів енергії у систему тяги [6, 12, 18, 19]. Вони виступають у ролі демпфіруючого елемента між генеруючими установками і споживачами системи тяги у нестационарних режимах [6, 7, 12, 20]. На залізничному транспорті найбільшого розповсюдження набули електрохімічні, індуктивні, ємнісні та інерційні накопичувачі енергії [21-24]. Вибір того чи іншого типу накопичувача зумовлений відповідністю його технічних характеристик висунутим критеріям. Як правило вибір типу

накопичувача проводиться за такими критеріями: гравеметрична щільність енергії; гравеметрична щільність потужності; об'ємна щільність енергії; об'ємна щільність потужності; ефективність зарядно-розрядного циклу; інтенсивність саморозряду; кількість циклів роботи; питома вартість; безпека експлуатації. Тобто вибір типу накопичувача енергії є багатокритеріальною задачею і належить до задач вибору найкращого проєктного рішення. При цьому вагомість критеріїв може бути різною відповідно до умов експлуатації, місця розміщення, визначених обмежень та притаманних режимів роботи тяговим навантаженням. За місцем їх розміщення у системі електричної тяги існує декілька варіантів, а саме: розміщення їх у системі електропостачання та на борту рухомого складу. Як показують результати досліджень при повторного-короткочасних режимах роботи тягового рухомого складу оптимальним варіантом розміщення накопичувача є розміщення безпосередньо на борту рухомого складу [6-8, 14, 22]. У порівнянні зі стаціонарними накопичувачами, це додатково розкриває можливість виключити транзит енергії по тяговій мережі у моменти рекуперативного гальмування та скоротити його при тяговому енергоспоживанні. Також накопичувачі енергії знаходять розповсюдження і серед автономного тягового рухомого складу для забезпечення більш рівномірного завантаження дизеля.

Основною задачею при використанні накопичувача енергії у системі тяги є організація оптимального керування протіканням енергообмінних процесів за рахунок узгодження режимів роботи накопичувача енергії та системи тяги. На рис. 8 представлено можливі концепції оптимального керування протіканням енергообмінних процесів за рахунок узгодження режимів роботи накопичувача енергії та системи тяги.

Концепція №1 передбачає стабілізацію транзиту потужності по системі тягового електропостачання у моменти пікового електроспоживання тяговим рухомих складом за рахунок попередньо накопиченої енергії електричного гальмування. Дана концепція не виключає передачі електроенергії у мережу під час режиму електричного гальмування. Однак значення потужності при цьому мінімізується за рахунок накопичення енергії з піковим значенням. Для концепцій №2 та №4 процес керування енергообміном у моменти пікового електроспоживання тяговим рухомих складом є аналогічним концепції №1. Концепції №3 та №5 передбачають зниження швидкості зміни потужності електроенергії, що споживається тяговим рухомих складом протягом розгону поїзду за рахунок попередньо накопиченої енергії. Процес накопичення енергії для даних концепцій відрізняється. Що стосується використання електроенергії рекуперативного гальмування то концепції №2 та №3 передбачають реалізацію режиму заряду накопичувача у проміжки часу коли поїзд слідує на вибігу. Для концепцій №4 та №5 режим заряду накопичувача реалізується на протязі часу реалізації режиму рекуперативного гальмування. За рахунок реалізації режиму заряду накопичувача у вказаний проміжок часу відбувається обмеження пікового значення потужності електроенергії рекуперації та зниження швидкості її зміни у системі тягового електропостачання.

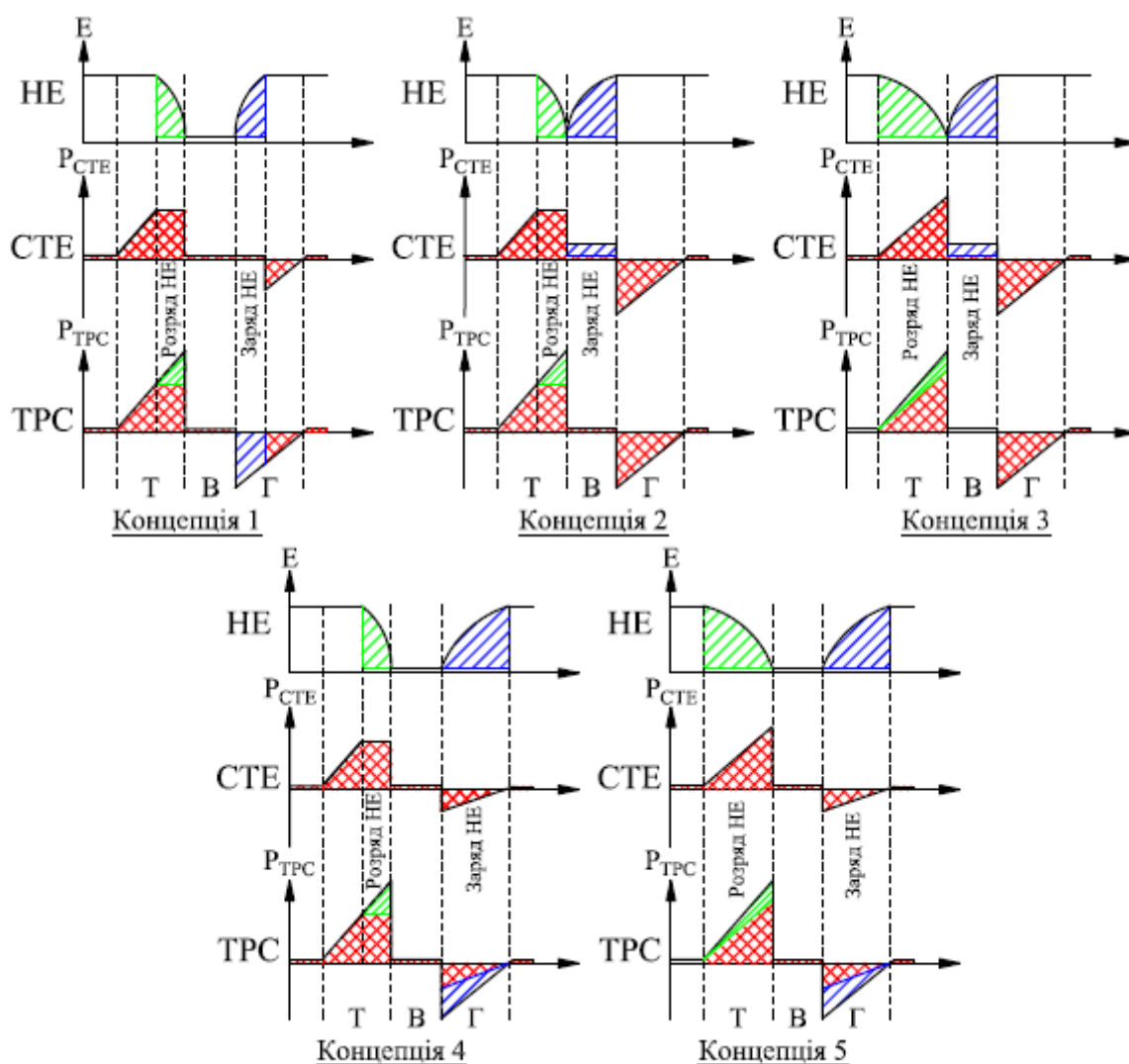


Рис. 8. Циклограми роботи бортового накопичувача енергії за різних концепцій організації керування енергообмінними процесами у системі тяги

НЕ – накопичувач енергії; ТМ – система тягового електропостачання; ТРС – тяговий рухомий склад; Т – режим тяги; В – вибіг; Г – режим електричного гальмування; $P_{СТЕ}$ – потужність електроенергії, що протікає по системі тягового електропостачання; $P_{ТРС}$ – потужність електроенергії на струмоприймачі ТРС

Висновки. Проведений аналіз умов експлуатації тягового рухомого складу залізничного транспорту показав, що характерними для приміського залізничного транспорту є повторно-короточасні режими роботи з високо інтенсивним, несталим споживанням та генеруванням енергії значної потужності тривалістю десятки секунд. Результати проведеного аналізу часових діаграм електроспоживання приміського та міського електротранспорту показав, що експлуатація електропоїздів метрополітену супроводжується більш значною нерівномірністю електроспоживання та більш суттєвими втратами в агрегатах системи тяги у порівнянні з електропоїздами приміського сполучення. Інтегральні енергетичні показники пік-фактор та коефіцієнт форми дозволяють кількісно оцінити нерівномірність споживання електроенергії та величину втрат у системі тягового електропостачання. Встановлено, що реалізація режиму

гальмування з рекуперацією енергії призводить до збільшення нерівномірності електроспоживання у системі тяги та призводить до виникнення додаткових втрат у системі. Наведено одні із перспективних концепцій керування протіканням енергообмінних процесів за рахунок узгодження режимів роботи накопичувача енергії та системи тяги, що сприятимуть зменшенню нерівномірності електроспоживання. В подальшому має бути проведено порівняльну оцінку наведених концепцій керування енергообмінними процесів за критерієм «мінімуму втрат» з врахуванням складності реалізації алгоритму керування сумісної роботи елементів системи електричної тяги.

ЛІТЕРАТУРА

1. Залізничний транспорт. Міністерство інфраструктури України. URL: <http://mtu.gov.ua/timeline/Zaliznichniy-transport.html> (дата звернення: 15.04.2022).
2. Стратегічне бачення розвитку транспорту України. Міністерство інфраструктури України. URL: <http://mtu.gov.ua/content/strategiya-2015.html> (дата звернення: 15.04.2022).
3. Кузнецов В. Г., Саблін О.И., Губский П. В., Колыхаев Е.Г. Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена. // Гірнична електромеханіка та автоматика. 2015. №95. С. 81-89.
4. Саблін О. І. Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системі і електричного транспорту : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.09 / УДУНТ. Дніпро, 2018. 364 с.
5. Інтегрований звіт АТ «УКРЗАЛІЗНИЦЯ» за 2019 рік. URL: http://www.uz.gov.ua/files/file/about/investors/Book_UZ_19_UA_FIN_web.pdf (дата звернення: 15.04.2022).
6. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyubarskyi B., Yeritsyan B. Method to Improve the Efficiency of the Traction Rolling Stock with Onboard Energy Storage // International Journal of Renewable Energy Research. 2019. Vol. 9, № 2. P. 848-858.
7. Шевлюгин М. В. Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии : дис. ... д-ра техн. наук. МИИТ. Москва, 2013. 424 с.
8. Павелчик М. Повышение эффективности электрической тяги при помощи накопителей энергии : дис. ... д-ра техн. наук. МИИТ. Москва, 2000. 451 с.
9. Сулим А. А., Сичев С. Д., Распопин В. Р. Экономия электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена // Электромеханические и энергетические системы, методы моделирования и оптимизации: материалы X межд. науч.-тех. конф. Кременчуг : КНУ им. М. Остроградского, 2012. С. 344.
10. Sheng Lin, Di Huang, Wang Aimin, Huang Yujian, Zhao Liping, Rui Luo, Guotao Lu. Research on The Regeneration Braking Energy Feedback System of Urban Rail Transit // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. P. 7329-7339. doi: 10.1109/TVT.2019.2921161.
11. Yang Z., Xia H., Wang B., Lin F. An overview on braking energy regeneration technologies in Chinese urban railway transportation // International Power Electronics Conference IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA. 2014. P. 2133-2139. doi: 10.1109/IPEC.2014.6869883.
12. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock // Computational problems of electrical engineering journal. 2019. Vol. 9, № 1. P. 44-51.
13. Pena-Alcaraz M., Fernandez A., Cucala A. P., A. Ramos A., Pecharroman R. R., Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy // Journal of rail and rapid transit. 2012. vol. 226, № 4. P. 397-408. doi: 10.1109/IPEC.2014.6869883.
14. Lelas M., Pavlovic T., Ban Z. A. Supercapacitor based energy storage system for urban transportation energy efficiency improvement // International conference on electrical drives and power electronics. 2015. P. 430-436. doi: 10.1109/EDPE.2015.7325333.
15. Укрзалізниця визначила найпопулярніші поїзди та напрямки в Україні. Офіційний сайт Укрзалізниці. URL: http://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/545833 (дата звернення: 07.02.2022).
16. Басов Г. Г., Яцько С. І. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу : навч. посіб. Ч. 2. Харків : Аспект, 2005. 259 с.
17. Цукало П. В., Ерошкин Н. Г. Электropоезда ЭР2 и ЭР2Р : Транспорт, 1986. 249 с.
18. Sumpravakup C., Ratniyomchai T., Kulworawanichpong T. Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy // Journal of modern transportation. 2017. Vol. 25, № 4. P. 223-235. doi: 10.1007/s40534-017-0146-6.
19. M. Dominguez M., Fernández-Cardador A., Cucala A. P., Pecharroman R. R. Energy savings in metropolitan railway substations through regenerative energy recovery and optimal design of ATO speed profiles // IEEE transactions on automation science and engineering. 2012. Vol. 9, № 3. P. 496-504. doi: 10.1109/tase.2012.2201148.
20. Sulym A. On the question of a reasonability of capacitive storages use in the metro // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2015. Vol. 29, № 1. P. 94-100.

21. Liu X., Li K. Energy storage devices in electrified railway systems: a review //Transportation safety and environment. 2020. Vol. 2, № 3. P. 183–201. doi: 10.1093/tse/tdaa016.
22. Omelyanenko V. I., Riabov Ie. S., Overianova L. V., Omelianenko H. V. Traction electric drive based on fuel cell batteries and on-board inertial energy storage for multi unit train // Electrical engineering & electromechanics. 2021. № 4. P. 64-72. doi: 10.20998/2074-272x.2021.4.08.
23. Омеляненко В. И., Омеляненко Г. В., Оверьянова Л. В. Инерционные накопители энергии для железных дорог // Локомотив-информ. 2020. № 1. С. 26-32.
24. Thompson, R. C.; Kramer, J.; Hayes, R. J. Response of an urban bus flywheel battery to a rapid loss-of-vacuum event // Journal of advanced materials. 2005. Vol. 37. № 3. P. 42–50.

REFERENCES

1. Zaliznychnyi transport. Ministerstvo infrastruktury Ukrainy. [Railway transport. Ministry of Infrastructure of Ukraine]. *mtu.gov.ua*. Retrieved from <http://mtu.gov.ua/timeline/Zaliznichniy-transport.html> [in Ukrainian].
2. Stratehichne bachennia rozvytku transportu Ukrainy. [Strategic vision of transport development in Ukraine]. *mtu.gov.ua*. Retrieved from <http://mtu.gov.ua/content/strategiya-2015.html> [in Ukrainian].
3. Kuznetsov V. H., Sablyn O.Y., Hubsnyi P. V., Kolikhaev E.H. (2015) Analiz rezervov energosberezheniya pri vnedrenii sistemyi rekuperatsii energii na poezdah Dnepropetrovskogo metropolitena [Analysis of energy saving reserves during the implementation of the energy recovery system on the trains of the Dnepropetrovsk metro]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka – Mining Electromechanics and Automation*, 95, 81–89 [in Ukrainian].
4. Sablin O. I. (2018) Rozvytok metodiv i zasobiv pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannia enerhii rekuperatsii v system i elektrychnoho transportu [Development of Methods and Means for Improvement of the Energy Regeneration Efficiency in the Electric Transport System]. Doctor’s thesis. Dnipro: USUST [in Ukrainian].
5. Intehrovanyi zvit AT «UKRZALIZNYTsla» za 2019 rik. [Intehrovanyy zvit AT «UKRZALIZNYTSLA» za 2019 rik [Integrated report of JSC UKRZALIZNYTSLA for 2019.]. (n.d.). www.uz.gov.ua. Retrieved from http://www.uz.gov.ua/files/file/about/investors/Book_UZ_19_UA_FIN_web.pdf [in Ukrainian].
6. Yatsko S, Sidorenko A, Vashchenko Ya, Lyubarskyi B, Yeritsyan B. (2019). Method to Improve the Efficiency of the Traction Rolling Stock with Onboard Energy Storage. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9(2), 848–858.
7. Shevlyugin M. V. (2013) Energoberegayushchiye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenakh, realizuyemye s ispol'zovaniyem nakopiteley energii [Energy-saving technologies in railway transport and subways implemented using energy storage devices]. *Doctor’s thesis*. Moscow: MIIT [in Russian].
8. Pavelchik M. (2000) Povysheniye effektivnosti elektricheskoy tyagi pri pomoshchi nakopiteley energii [Increasing the efficiency of electric traction with energy storage]. Doctor’s thesis. Moscow: MIIT [in Russian].
9. Sulim A. A., Sichev S. D., Raspopin V. R. Ekonomiya elektroenerhii pri ispol'zovanii rekuperativnogo tormozheniya na vagonakh metropolitena [Saving energy when using regenerative braking on subway cars]. *Elektromekhanicheskiye i energeticheskiye sistemy, metody modelirovaniya i optimizatsii – Electromechanical and power systems, modeling and optimization methods: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*, p. 344, Kremenchug: KNU M. Ostrogradsky [in Ukrainian].
10. Sheng Lin, Di Huang, Wang Aimin, Huang Yujian, Zhao Liping, Rui Luo, Guotao Lu (2019). Research on The Regeneration Braking Energy Feedback System of Urban Rail Transit. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 7329–7339. doi: 10.1109/TVT.2019.2921161.
11. Yang Z., Xia H., Wang B., Lin F. (2019) An overview on braking energy regeneration technologies in Chinese urban railway transportation. *International Power Electronics Conference IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA*, 2133–2139. doi: 10.1109/IPEC.2014.6869883.
12. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya. (2019) Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational problems of electrical engineering journal*, 9(1), 44–51.
13. Pena-Alcaraz M., Fernandez A., Cucala A. P., A. Ramos A., Pecharroman R. R. (2012) Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy. *Journal of rail and rapid transit*, 226(4), 397–408. doi: 10.1109/IPEC.2014.6869883.
14. Lelas M., Pavlovic T., Ban Z. A. (2015) Supercapacitor based energy storage system for urban transportation energy efficiency improvement. *International conference on electrical drives and power electronics*, 430–436. doi 10.1109/EDPE.2015.7325333.
15. Ukrzaliznytsya vyznachyla naypopulyarnishi poyizdy ta napryamky v Ukrayini. Ofitsiynnyy sayt Ukrzaliznytsi. [Ukrzaliznytsia has identified the most popular trains and destinations in Ukraine. Official site of Ukrzaliznytsia]. www.uz.gov.ua. Retrieved from http://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/545833 [in Ukrainian].
16. Basov H. H., Yats’ko S. I. (2005). *Rozvytok elektrychnoho motorvahonnoho rukhomoho skladu* [Development of electric railcar rolling stock]. Kharkiv: VTD «Apeks+» [in Ukrainian].
17. Tsukalo P. V., Yeroshkin N. G. (1986). *Elektropoyezda ER2 i ER2R* [Electric trains ER2 and ER2R]. Moscow: VTD «Transport » [in Russian].

18. Sumpavakup C., Ratniyomchai T., Kulworawanichpong T. (2017). Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy. *Journal of modern transportation*, 259(4), 223–235. doi: 10.1007/s40534-017-0146-6.
19. M. Dominguez M., Fernández-Cardador A., Cucala A. P., Pecharroman R. R. (2012) Energy savings in metropolitan railway substations through regenerative energy recovery and optimal design of ATO speed profiles. *IEEE transactions on automation science and engineering*, 9(3), 496–504. doi: 10.1109/tase.2012.2201148.
20. Sulym A. (2015). On the question of a reasonability of capacitive storages use in the metro // *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, 29(1), 94–100.
21. Liu X., Li K. (2020). Energy storage devices in electrified railway systems: a review. *Transportation safety and environment*, 2(3), 183–201. doi: 10.1093/tse/tdaa016.
22. Omelyanenko V. I., Riabov Ie. S., Overianova L. V., Omelianenko H. V. (2021) Traction electric drive based on fuel cell batteries and on-board inertial energy storage for multi unit train. *Electrical engineering & electromechanics*. (4), 64–72. doi: 10.20998/2074-272x.2021.4.08.
23. Omel'yanenko V. I., Omel'yanenko G. V., Over'yanova L. V. (2020). Inertsionnyye nakopiteli energii dlya zheleznykh dorog [Inertial energy storage devices for railways]. *Lokomotyv-inform – Locomotive-inform*, 1, 26–32 [in Ukrainian].
24. Thompson, R. C.; Kramer, J.; Hayes, R. J. (2005). Response of an urban bus flywheel battery to a rapid loss-of-vacuum event. *Journal of advanced materials*, 37(3), 42–50.

Anatolii Sydorenko¹, Serhii Yatsko²

¹. Senior engineer of ELAKS company, Kharkiv, Ukraine

². PhD (Tech). Associate Professor, department of electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square 7, Kharkiv, Ukraine

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE OPERATING MODES OF THE ELECTRIC TRACTION SYSTEM ON LOSSES FROM UNEVENNESS OF ELECTRICITY CONSUMPTION AND MEASURES TO REDUCE THEM

The article considers the current problem of uneven electricity consumption in railway transport and steps to reduce it. The analysis of conditions of operation of traction rolling stock is carried out. Based on the results of the analysis, the characteristics of the modes of operation of traction rolling stock of railway transport and energy processes in the system of electric traction during their implementation are given. The factors that lead to energy losses due to uneven traction power consumption are presented. Indicators for estimating the unevenness of traction electricity consumption in the case of the subway and suburban rail transport are proposed. The use of integrated energy indicators peak factor and shape coefficient is proposed as indicators. The peak factor characterizes the level of excess power of the power supply system, the shape coefficient - losses in the traction power supply system. According to these indicators, the time diagrams of electricity consumption at the feeder of the railway traction substation and the subway electric train were evaluated. The results of the quantitative assessment confirmed the adverse effect of certain factors on the unevenness of traction power consumption. It was found that the modes of operation of the subway electric train provoke more significant energy losses in the elements of the traction power supply system compared to the railway. It is proved that regenerative braking increases the unevenness of energy consumption, increasing the load on the traction network and contributing to the emergence of pulsed currents in the traction power supply system. Concepts for overcoming the problems of uneven traction power consumption and the use of excess energy recovery are based on the use of energy storage as an additional power source for traction drive.

Keywords: mode of operation, uneven power consumption, losses, peak factor, shape coefficient, energy storage.