

Енергоефективність підприємств електротранспорту в Україні

Аналітичне дослідження

“Енергоефективність підприємств електротранспорту в Україні. Аналітичне дослідження”.

В'ячеслав Скриль, громадська організація “Vision Zero”, 2025 рік.

Автор дослідження:

В'ячеслав Скриль - провідний інженер та експерт з електроенергетики. Закінчив Донбаський державний технічний університет, магістр за фахом «Електричні машини та апарати». Досвід практичної роботи з тяговими підстанціями трамвая, тролейбуса та метрополітену, проектування систем електропостачання для електричного транспорту (кабельні та контактні мережі, тягові підстанції), в т.ч. автоматика, захисти, керування, електротехнічні розрахунки. Має досвід роботи на макрорівні, зокрема моделювання режимів роботи енергосистем.

Підтримка:

Проект реалізується за підтримки Європейської кліматичної фундації (<https://europeanclimate.org/>). Відповідальність за інформацію та погляди, висловлені у цьому звіті, лежить на авторах дослідження. Європейська кліматична фундація не може бути визнана відповідальною за будь-яке використання інформації, яка викладена в цьому дослідженні та не обов'язково поділяє думки, оцінки та висновки, наведені в цьому звіті.

Подяка:

Громадська організація “Vision Zero” висловлює подяку колегам з професійної спільноти, які люб'язно прочитали чернетку цього дослідження та надали свої зауваження та пропозиції, переважна частина яких були враховані (за абеткою): Анатолій Миронюк (КП “Луцьке підприємство електротранспорту”), Геннадій Сорокін (КП “Запоріжелектротранс”), Володимир Кобець (КП “Дніпровський електротранспорт”), Катерина Лозовенко, Максим Сич, Олег Гульпак (КП “Чернівецьке тролейбусне управління”), Святослав Павлюк та Мар'яна Приступа (Асоціація “Енергоефективні міста України”).

Партнери проєкту:

Громадська організація “Vision Zero”

м. Івано-Франківськ, 74019, вул. Пулюя, буд.12, кв.38

www.visionzero.org.ua, E-mail vision.zero.ngo@gmail.com

тел. +380 98 907 73 65

Керівник проєкту та координатор дослідження: Віктор Загреба, viktor@zagreba.com

Асоціація “Енергоефективні міста України”

м. Львів, 79007, вул. Б. Лепкого, 12, офіс 6

www.enefcities.org.ua, E-mail office@enefcities.org.ua, тел. +38 032 245 52 62

Про цей документ

Дослідження було проведено у 2024-2025 роках на основі даних про енергоспоживання за 2015-2024 роки. Дослідження включало збір даних, аналіз відкритих джерел та інтерв'ю з експертами, проведені з обраними перевізниками електричного громадського транспорту. Дані про енергоспоживання були отримані від 17 комунальних підприємств електротранспорту України, що мають в наявності: тільки тролейбуси, тільки трамваї та трамваї і тролейбуси.

Комунальні підприємства, що люб'язно надали інформацію для дослідження:

1. КП "Вінницька транспортна компанія"
2. КП "Електроавтотранс" (Івано-Франківськ)
3. КП "Конотопське транспортне управління"
4. КП "Дніпровський електротранспорт"
5. КП "Транспорт" Кам'янської міської ради
6. ЛКП "Львівелектротранс"
7. КП "Миколаївелектротранс"
8. ХКП "Електротранс" (м.Хмельницький)
9. КП "Чернівецьке тролейбусне управління"
10. КП "Полтаваелектроавтотранс"
11. КП "Електроавтотранс" (Суми)
12. КП "Житомирське трамвайно-тролейбусне управління"
13. КП "Луцьке підприємство електротранспорту"
14. КП "Рівнеелектроавтотранс"
15. КП "Запоріжелектротранс"
16. КП "Одесаміськеелектротранс"
17. КП "Чернігівське тролейбусне управління"

Інформація щодо енергоспоживання електротранспорту в інших країнах Європи була отримана для міст Польщі з непрямих джерел (наукових досліджень) та напряду від транспортного підприємства «МРК» у м.Кракові (Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne w Krakowie). Ще до 16 міст Польщі, Чехії, Швейцарії, Естонії, Латвії та Хорватії були надіслані офіційні листи із запрошенням взяти участь у порівняльному дослідженні, надавши свої дані, однак ці міста не відповіли на звернення або відмовились від участі.

Зміст:

Резюме	6
Аналіз споживання електроенергії підприємствами МЕТ	7
Вхідні дані	7
Методика	8
Блок рухомого складу	8
Аналіз витрат електроенергії по містах України	13
Аналіз витрат електроенергії по містах Європи	14
Енергоефективні рішення європейських міст	14
Підвищення напруги	19
Накопичувачі на підстанціях	19
Порівняння витрат електроенергії на перевезення одного пасажир	23
Порівняння витрат на тягу	24
Оцінка впливу об'ємів руху на витрати електроенергії на тягу.	31
Порівняння витрат на технологічні потреби	37
Власні джерела електроенергії українських підприємств МЕТ	40
Можливості підвищення енергоефективності	41
Оновлення рухомого складу	41
Модернізація системи електропостачання	45
Встановлення власних джерел енергії та зменшення технологічних витрат	49
Підсумок	51
Джерела	52
Додатки	53

Резюме

Цей документ є базовим дослідженням, присвяченим аналізу та підвищенню енергоефективності підприємств міського електротранспорту в Україні. Він містить порівняльний аналіз з європейським досвідом, виявляючи ключові фактори, що впливають на споживання електроенергії.

Основні аспекти дослідження:

- **Методологія:** Дослідження базується на даних, зібраних з 17 українських міст за період 2014-2023 років, а також порівняльних даних з Кракова (Польща). Аналіз охоплює макропоказники енергоспоживання, включаючи витрати на тягу та електроопалення, пробіг рухомого складу та його структуру. Для розрахунку питомих витрат на 1 км пробігу застосовано математичну модель з ітеративним методом оптимізації.
- **Ключові висновки:** Виявлено значні коливання питомих витрат електроенергії між різними українськими містами, що корелює з часткою сучасного рухомого складу та обсягами руху.
- **Рекомендовані заходи для підвищення енергоефективності:**
 - Оновлення та модернізація рухомого складу: Це може забезпечити до 25% зменшення споживання електроенергії на тягу.
 - Оптимізація системи електропостачання: Запропоновано заходи для зменшення втрат електроенергії (з поточних 17% до 9-11%), включаючи встановлення накопичувачів енергії на тягових підстанціях для ефективнішого використання енергії рекуперації.
 - Запровадження власних джерел енергії та скорочення технологічних витрат: Рекомендується використання дахових сонячних електростанцій та термомодернізація будівель депо/адміністративних приміщень для зменшення технологічних втрат (10-15% від загального споживання).

Цей аналіз пропонує конкретні та практичні рішення для підвищення енергоефективності українського електротранспорту, що робить його обов'язковим для ознайомлення фахівцям та всім, хто цікавиться стійким розвитком міської інфраструктури.

Аналіз споживання електроенергії підприємствами МЕТ

Вхідні дані

В якості вхідних даних для аналізу енергоспоживання підприємств міського електротранспорту (далі МЕТ) використовувались як запитувані дані у самих підприємств, так і публічні джерела інформації. До 21 міста України, що мають електротранспорт, було надіслано запити щодо щорічних даних за період 2014–2023 рр., які включали:

- сумарний річний пробіг трамваїв (км);
- сумарний річний пробіг тролейбусів (км);
- річна витрата електроенергії підприємством (кВт·год);
- річна витрата електроенергії на тягу, виміряна на тягових підстанціях (кВт·год);
- тип (сонячні чи інші), встановлена потужність (кВт), річна генерація (кВт·год) власних джерел електричної енергії (за наявності);
- кількість депо, з них із електроопаленням, річна витрата електроенергії на електроопалення (кВт·год);
- довжина трамвайної мережі в одноколіїному обчисленні (км);
- довжина тролейбусної мережі в односторонньому обчисленні (км).

Відповіді з усіма запитуваними даними отримано від 17 міст. Ще 2 міста надали скорочені відповіді з даними, непридатними для дослідження. Таким чином, 17 міст увійшли до вибірки для дослідження. Їм проведено додаткову вибірку даних щодо кількості рухомого складу по модельно за роками на основі даних Корпорації «Укрелектротранс» [1].

У 16 підприємств МЕТ в країнах ЄС та Швейцарії були також запитані щорічні дані за період 2014–2023 рр.:

- сумарний річний пробіг трамваїв (км);
- сумарний річний пробіг тролейбусів (км);
- річні витрати електроенергії підприємством (кВт·год);
- річні витрати електроенергії на тягу, виміряна на тягових підстанціях (кВт·год);
- тип (кислотні акумулятори, літєві акумулятори, суперконденсатори чи інше), встановлена потужність (кВт), ємність (кВт·год), річна витрата електроенергії на заряд та розряд (кВт·год) накопичувачів енергії рекуперації, що встановлені на тягових підстанціях (за наявності);
- тип (сонячні чи інші), встановлена потужність (кВт), річна генерація (кВт·год) власних джерел електричної енергії (за наявності);
- кількість депо, з них із електроопаленням, річна витрата електроенергії на електроопалення (кВт·год);
- довжина трамвайної мережі в одноколіїному обчисленні (км);
- довжина тролейбусної мережі в односторонньому обчисленні (км);
- трамваї, які працюють на лінії, за типами:
 - тип;
 - довжина (м);
 - система керування (реостатна, електронна без рекуперації, електронна з рекуперацією);
 - кількість.
- тролейбуси, які працюють на лінії, за типами:
 - тип;
 - довжина (м);
 - система керування (реостатна, електронна без рекуперації, електронна з рекуперацією);
 - кількість.

Методика

Для кожного з підприємств МЕТ виконано внесення, обробку та первинний аналіз вхідних даних в електронні таблиці, базова форма яких є однаковою для всіх підприємств. Таблиці для всіх міст представлені у Додатку А.

Таблиця включає в себе наступні вхідні дані:

1. **Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВт·год, з них:**
 - на тягу (виміряні на тягових підстанціях), кВт·год;
 - на електроопалення депо, кВт·год.
2. **Власні джерела енергії:**
 - тип (фотопанелі тощо);
 - встановлена потужність, кВт;
 - річна генерація, кВт·год.
3. **Кількість депо:**
 - з них із електроопаленням.
4. **Сумарний річний пробіг трамваїв, ваг·км.**
5. **Довжина трамвайної мережі в одноколіїному обчисленні, км.**
6. **Кількість трамваїв за довжиною:**
 - [довжина 1]:
 - з реостатною системою керування;
 - з електронною системою керування без рекуперації;
 - з електронною системою керування та рекуперацією;
 - [довжина 2];
 - [довжина ...];
 - [довжина n].
7. **Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш·км.**
8. **Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км.**
9. **Кількість тролейбусів за типом:**
 - Одинарні:
 - з реостатною системою керування;
 - з електронною системою керування без рекуперації;
 - з електронною системою керування та рекуперацією;
 - Зчленовані;
 - Зчленовані (двосекційні)

Блок рухомого складу

Кількість трамвайних вагонів за довжиною та типом системи керування визначалася на основі даних [1], які включають кількість вагонів помодельно. Для кожної моделі на підставі великої кількості джерел було визначено довжину та тип системи керування.

Необхідність групування вагонів за типами систем керування викликана тим, що це один із головних чинників, який впливає на їхнє споживання електроенергії. Групування виконано за такими типами систем: реостатна (РК), електронна без рекуперації (ЕС), електронна з рекуперацією (ЕР).

Групування за довжиною виконано з метою подальшого аналізу питомих витрат. Очевидно, що витрати електроенергії на тягу коротким одинарним трамвайним вагоном та великим багатосекційним є різними навіть за однакових умов та з однаковим типом систем керування. Головним чинником, що впливає на це, є вага цих вагонів, яка в середньому прямо пропорційна їхній довжині. Тому вони згруповані саме за цим параметром, який далі використовується для приведення їхніх пробігів до умовних одиниць.

Кількість тролейбусів за типом та системою керування визначалася аналогічно до трамваїв на основі даних [1]. Проте у випадку тролейбусів групування відбувалося за типом (одинарні, зчленовані, двосекційні) замість прямого значення довжини.

У таблицях для підприємств МЕТ комірки з вхідними даними позначено білим кольором (рис. 1).

Примітка:

1. Для підприємств міського електричного транспорту (МЕТ), що мають лише один вид електротранспорту (трамвай або тролейбус), рядки даних для відсутнього виду не заповнювалися та видалялися.
2. У деяких містах прибуття значної кількості нового рухомого складу (РС) не відразу призводило до його виходу на лінію, оскільки тривав тривалий процес підготовки (особливо у випадках прибуття вживаного РС). Також в окремих містах надходження нового рухомого складу спричиняло виведення з експлуатації значної кількості старого, без його списання з балансу. Щоб зменшити вплив цього фактора на подальші розрахунки, для років і міст, де відбувалися різкі зміни кількості рухомого складу, додатково аналізувалася зміна структури випуску. Це робилося на основі даних онлайн-моніторингу [2] та неофіційної бази даних РС [3], за якою ідентифікувалися типи РС за бортовим номером. Таким чином, кількість РС в окремих випадках могла бути скоригована відповідно до фактичного випуску на лінію. Такі комірки вхідних даних позначені жовтим кольором

На основі вхідних даних виконувалися розрахунки. Комірки з розрахунковими даними в таблицях позначено світлопомаранчевим кольором (рис. 1).

Місто, назва підприємства: Конотоп, КП "Конотопське транспортне управління"										
Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Трамвайна мережа										
Сумарний річний пробіг трамваїв, ваг-км	547600	585900	524000	531500	347400	493500	628600	614900	381100	356700
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв, ваг-км	558552	597618	534480	542130	354348	493500	616028	602602	373478	348377
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв РК, ваг-км	521315	557777	496303	503406	329037	348487	295926	289476	179410	179709
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕС, ваг-км	37236,8	39841,2	38177,1	38723,6	25310,6	38720,8	49320,9	48246	29901,7	25988,1
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕР, ваг-км	0	0	0	0	0	106292	270782	264880	164166	142680
Довжина трамвайної мережі в одноколіїному обчисленні, км	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8
Коефіцієнт використання трамвайної мережі (пробіг за годину)	2,24861	2,40588	2,14582	2,1825	1,42653	2,02646	2,57417	2,52497	1,56491	1,46472
Коефіцієнт використання трамвайної мережі умовний	2,29358	2,454	2,19474	2,22615	1,45506	2,02646	2,5296	2,47447	1,53361	1,43054
Кількість трамваїв за довжиною	15	15	14	14	14	13	13	13	13	14
13-15 м	0	0	0	0	0	3	6	6	6	7
з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	3	6	6	6	6
15-16 м	15	15	14	14	14	10	7	7	7	7
з реостатною системою керування	14	14	13	13	13	9	6	6	6	6
з електронною системою керування без рекуперації	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рисунок 1. Приклад позначення даних у таблицях. Вирізка з таблиці даних м. Конотоп. Комірки вхідних даних позначені білим, скориговані вхідні дані – жовтим, розрахункові – світлопомаранчевим.

Насамперед, було прийнято **умовний трамвай** та **умовний тролейбус**, для яких розраховуватимуться питомі витрати. За **умовний трамвай** прийнято вагон довжиною 15 м, а за **умовний тролейбус** – одинарний тролейбус. Ці параметри відповідають більшості рухомого складу міст України.

Таким чином, для кожної групи трамваїв за системою керування було розраховано кількість умовних трамваїв з цією системою керування НУТ за наступною формулою:

$$N_{\text{УТ}} = \frac{N_{\text{Т}} \times L_{\text{Т}}}{L_{\text{УТ}}}$$

де $N_{\text{Т}}$ – фактична кількість трамваїв;

L_T – середня довжина для даної групи трамваїв, м;

$L_{yT} = 15$ – довжина умовного трамвая, м.

Далі розрахована сумарна кількість умовних вагонів (приведених до 15 м) та їх відсоткова частка у структурі парку.

Для кожної групи тролейбусів за системою керування також було розраховано кількість умовних з цією системою керування N_{yTp} за наступною формулою:

$$N_{yTp} = N_{Tp} \times K_{Tp}$$

де N_{Tp} – фактична кількість тролейбусів;

K_{Tp} – коефіцієнт приведення, що фактично відповідає співвідношенню довжини фактичного та умовного тролейбуса, та дорівнює 1 для одинарного, 1,5 – для зчленованого, 2 – для двозчленованого.

Далі розраховано сумарну кількість умовних тролейбусів (приведених до одинарного) та їхню відсоткову частку у структурі парку.

Для умовних трамваїв розраховується сумарний річний пробіг S_{yT} :

$$S_{yT} = S_T \times \frac{N_{yT}}{N_T}$$

де S_T - сумарний річний пробіг трамваїв.

Аналогічно розраховано сумарний річний пробіг S_{yTp} для умовних тролейбусів.

Блок пробігів та довжини мережі

Сумарний річний пробіг умовних трамваїв та сумарний річний пробіг умовних тролейбусів для кожної групи за типом системи керування розраховано як частку від загального річного пробігу умовного трамвая чи тролейбуса, пропорційну до частки цієї групи в структурі парку.

На основі річного пробігу та довжини трамвайної мережі розраховано коефіцієнти використання трамвайної та тролейбусної мережі. Ці коефіцієнти показують середню кількість проїзду рухомого складу точки мережі за годину. Важливо зазначити, що цей показник не може бути використаний виключно для оцінки ефективності використання мережі як інфраструктури, він не відображає впливу на витрати електроенергії. Тому було розраховано також і умовні коефіцієнти використання трамвайної та тролейбусної мережі, які є аналогічними, але використовують розрахований річний пробіг для умовних трамваїв та тролейбусів.

Примітка: для тролейбусів, що мають запас ходу і проїжджають частину маршруту не під контактною мережею – їх рух враховано як під нею, тому що під час під'єднання вони компенсують недовитрачене споживання електроенергії під час руху на акумуляторах додатковим споживанням на їх заряджання.

Блок витрат електроенергії

Для кожного року розраховано витрати на технологічні потреби підприємства, як різницю між загальними річними витратами електроенергії та витратами на тягу з електроопаленням, за його наявності. У випадку відсутності даних про витрати на електроопалення, їх значення приймалося нульовим, та, відповідно, їх значення попадало у технологічні витрати.

Для кожного виду витрат електроенергії визначено їх частку у загальному споживанні.

Основним показником, який підлягатиме подальшому аналізу, є питомі витрати електроенергії на 1 км руху.

Цей показник обраховується для кожної групи РС за типом систем керування (три типи систем: РК, ЕС, ЕР), тобто три показники для трамваїв та три показники для тролейбусів.

Для їх розрахунку використовуються математична модель, яка у спрощеному вигляді відображає реальну фізичну залежність, а саме кількість витраченої електроенергії на рух як добуток питомих витрат на пройдений шлях. Таким чином розрахункові витрати електроенергії W_p підприємством МЕТ за рік складатимуть:

$$W_p = S_{T-PK} \times w_{T-PK} + S_{T-EC} \times w_{T-EC} + S_{T-EP} \times w_{T-EP} + \\ + S_{Tp-PK} \times w_{Tp-PK} + S_{Tp-EC} \times w_{Tp-EC} + S_{Tp-EP} \times w_{Tp-EP}$$

де S_{T-PK} , S_{T-EC} , S_{T-EP} – пробіг умовних трамваїв з РК, ЕС, ЕР системою керування відповідно, км;

S_{Tp-PK} , S_{Tp-EC} , S_{Tp-EP} – пробіг умовних тролейбусів з РК, ЕС, ЕР системою керування відповідно, км;

w_{T-PK} , w_{T-EC} , w_{T-EP} – питомі витрати умовних трамваїв з РК, ЕС, ЕР системою керування відповідно, кВт·год/км;

w_{Tp-PK} , w_{Tp-EC} , w_{Tp-EP} – питомі витрати умовних тролейбусів з РК, ЕС, ЕР системою керування відповідно, кВт·год/км.

Оцінка відповідності питомих витрат

Оцінка відповідності питомих витрат відбувається через розрахунок річних витрат електроенергії та подальше порівняння отриманих значень з фактично виміряними. Це порівняння оцінюється за **середньоквадратичним відхиленням**. Сумарне середньоквадратичне відхилення за період спостереження є цільовою функцією. Її мінімізація забезпечує максимальну відповідність розрахованих питомих витрат фактичним.

Похибки розрахунку

Розрахунок може містити похибки, пов'язані з впливом дрібних **стохастичних факторів** на фактичні витрати, зокрема:

- нерівномірність частки випуску за наявними типами систем керування;
- неврахування можливої зміни середньої завантаженості рухомого складу пасажирями протягом досліджуваного періоду;
- витрати на обігрів та кондиціонування рухомого складу, які можуть бути нерівномірними по роках залежно від погодних умов. Ці витрати враховуються як витрати на тягу, оскільки вони є споживанням електроенергії з контактної мережі.

Метод розрахунку питомих витрат

Питомі витрати розраховуються ітеративним шляхом за допомогою функції «Розв'язувач» у MS Excel. Для цього як цільову функцію задають згадану вище суму середньоквадратичних відхилень (рис. 2) за період спостереження між фактичними та розрахунковими витратами електроенергії. Змінюваними комірками при цьому є значення питомих витрат (рис. 3) умовних трамваїв та умовних тролейбусів.

Місто, назва підприємства: Луцьк, КП "Луцьке підприємство електротранспорту"												
№	Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
1	Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:	5678580	7282113	8161268	7512236	7499484	7107765	5272809	6189855	4680113	4859243	
1a	на тягу (виміряні на тягових підстанціях), кВтг	4963490	6583672	7545573	6822645	6779472	6522878	4577384	5552406	4208933	4394421	
	частка, %	87,4072	90,4088	92,4559	90,8204	90,3992	91,7712	86,8111	89,7017	89,9323	90,4343	
	розрахункове значення	5098612	6613135	7151585	6723650	6706287	6643847	4758901	5414387	4067856	4557608	Цільова функція
	різниця / цільова функція	0,00074	2E-05	0,00273	0,00021	0,00012	0,00034	0,00157	0,00062	0,00112	0,00138	0,008851
	питомі витрати середні, кВтг/км	2,37057	2,42856	2,57382	2,47535	2,45512	2,37184	2,27404	2,2359	2,08174	1,93672	0

Рисунок 2. Цільова функція – сума середньоквадратичних відхилень, мінімізація якої є метою розрахунку.

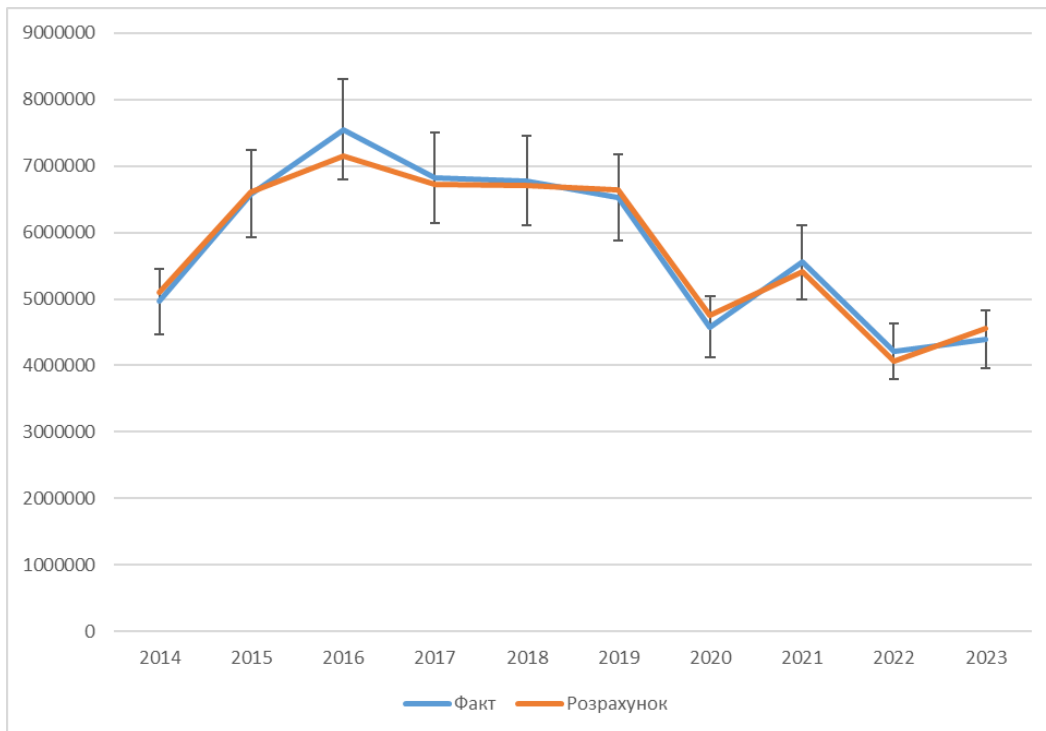
Для оптимізації та прискорення пошуку рішення для розрахункових питомих значень задавалися стартові значення («Орієнтовне») блоків питомих витрат, а також мінімальне (Мін) та максимальне значення (Макс) (рис. 3).

Стартове значення («Орієнтовне») за принципом роботи Розв'язувача не має суттєвого впливу на кінцевий результат. Мінімальне та максимальне обмеження чітко виконуються, але за мінімальне було прийняте 0, бо від'ємні значення протирічать фізичному сенсу витрат електроенергії на рух, а максимальне 10 – обрано умовно зі значним запасом, для обмеження неефективних ітерацій Розв'язувача. У випадку, якби розрахункові значення наближалися до максимального, останнє було б збільшено, але в цьому не було потреби. Проміжні обмеження між питомими витратами для різних типів систем керувань відповідають їх фактичним фізичним параметрам, при яких витрати $PK > EC$, через додаткові втрати у реостатах під час розгону, а витрати $EC > EP$, через додаткові втрати у реостатах під час гальмування.

7	Тролейбусна мережа											
7a	Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш-км	2093800	2710935	2931663	2756239	2761365	2750131	2012888	2483303	2021834	2269007	Ws, питоме споживання, кВтг/км
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів, маш-км	2093800	2710935	2931663	2756239	2761365	2750131	2012888	2483303	2021834	2269007	Розрахов Орієнтов Мін Макс
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів РК, маш-км	1809895	2210455	2390433	2247395	2209092	2150102	1470956	1419030	886283	942964	2,569231
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕС, маш-км	35488,1	208533	225513	212018	230114	250012	193547	221723	138482	206273	2,438395
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕР, маш-км	248417	291947	315718	296826	322159	350017	348384	842549	997069	1119770	1,457389

Рисунок 3 – блок розрахунку питомих витрат.

Для візуальної оцінки результатів розрахунку питомих витрат у кожній електронній таблиці створено аркуш «Похибка коефіцієнтів». На ньому відображаються криві розрахункового та фактичного значень із графічним позначенням **10% похибки** (рис. 4).



*Рисунок 4. Приклад графічного відображення фактичного та розрахункового значення річних витрат електроенергії для оцінки якості розрахунку питомих витрат.
Період спостереження 2015-2023 рр. Значення в межах прийнятої похибки.*

Важливо зазначити, що ефективність цього методу розрахунку питомих витрат прямо залежить від ступеня зміни структури парку рухомого складу (РС) за типами систем керування. Чим більше таких змін відбувалося, тим ефективнішим буде метод. І навпаки, найменш придатним, по суті з неможливим рішенням, є випадок, коли структура парку та співвідношення обсягів роботи трамваїв і тролейбусів не змінювалися взагалі. Крім того, ці розраховані питомі витрати включають у себе також втрати в тяговій мережі.

Аналіз витрат електроенергії по містах України

Загальна ситуація по Україні є неоднорідною через різний тип електротранспорту в містах (трамваї, тролейбуси, або обидва види), а також різну частку рухомого складу зі старими реостатними та новішими електронними системами керування.

Нижче наведено розрахункові середньозважені по Україні значення питомих витрат на 1 км пробігу для умовних трамваїв та тролейбусів:

- трамваї з реостатними системами керування – 3,60 кВт·год/км;
- трамваї з електронними системами керування без рекуперації – 2,70 кВт·год/км;
- трамваї з електронними системами керування з рекуперацією – 2,24 кВт·год/км;
- тролейбуси з реостатними системами керування – 2,60 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування без рекуперації – 2,07 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 1,33 кВт·год/км.

При цьому **діапазон питомих витрат** для деяких систем керування коливається приблизно удвічі в різних містах. Це пов'язано з неоднаковою часткою сучасного рухомого складу та різними обсягами руху. Детальніше це описано в наступних розділах.

Витрати електроенергії на власні потреби по підприємствах МЕТ коливаються на рівні 10–20%.

Інформацію по кожному дослідженому місту окремо у додатках А-Р.

Аналіз витрат електроенергії по містах Європи

Детальні дані щодо витрат електроенергії надало лише одне європейське місто — Краків (Польща). Ще одне місто відмовило, а чотири повідомили, що працюють над запитом, але протягом чотирьох місяців з моменту надсилання відповіді з даними так і не було отримано.

Аналіз витрат для Кракова доступні у **додатку С**. Щодо інших міст Європи, проаналізовано окремі технічні рішення, що підвищують енергоефективність.

Енергоефективні рішення європейських міст

Аналіз мереж європейських міст зведено до порівняння структури парку рухомого складу за системами керування та технічних рішень тягових мереж. Це пов'язано з тим, що жодне з міст, до яких були надіслані запити, не надало даних щодо витрат електроенергії та пробігів.

Рухомий склад

Рухомий склад — головний споживач електричної енергії в електротранспортних системах, тому його **енергоефективність** відіграє першочергову роль у загальній енергоефективності всієї системи.

Більшість європейських міст, де електротранспортні системи існують багато років без закриття чи повторного відкриття, пройшли шлях оновлення свого парку рухомого складу. Трамвайні мережі часто модернізували, замінюючи реостатні системи на електронні (до 1990-х років без рекуперації). Перехід на сучасні електронні системи з рекуперацією переважно відбувається шляхом повної заміни вагонів. Багато старих трамваїв, які вже експлуатуються в Україні, але пройшли модернізацію в європейських містах, тепер закуповуються українськими містами для заміни своїх немодернізованих.

Тролейбусні системи рідше модернізували свій рухомий склад. Це пов'язано з тим, що життєвий цикл тролейбусів короткий і співставний з часом розвитку наступного покоління систем керування. Тому оновлення переважно відбувалося шляхом повної заміни рухомого складу на новий із сучасними системами керування та іншими перевагами (низькопідлоговість, акумулятори, кондиціонер тощо).

Рівень оновлення рухомого складу, як правило, був вищим у країнах та містах із розвиненішою економікою, високою вартістю електроенергії або низькими державними дотаціями на неї.

Щоб забезпечити об'єктивну оцінку, розглянемо не окремі міста, а всі населені пункти в межах однієї країни. Наприклад, Польща мала подібні стартові умови після розпаду РЕВ. На її прикладі проаналізуємо структуру рухомого складу за типами систем керування в міському електротранспорті (табл. 1, рис. 5).

Таблиця 1. Частка рухомого складу по типах систем керування у містах Польщі.

Місто	Частка, %		
	Електронні з рекуперацією	Електронні без рекуперації	Реостатні
Гдиня (тролейбус)	100,0	0,0	0,0
Люблін (тролейбус)	100,0	0,0	0,0
Тихи (тролейбус)	100,0	0,0	0,0
Вроцлав (трамвай)	100,0	0,0	0,0
Гданськ (трамвай)	100,0	0,0	0,0
Ольштин (трамвай)	100,0	0,0	0,0
Познань (трамвай)	92,7	0,0	7,3
Верхньосілезька агломерація (трамвай)	79,3	0,0	20,7
Варшава (трамвай)	73,7	0,0	26,3
Краків (трамвай)	69,8	0,0	30,2
Гожув Великопольський (трамвай)	63,6	0,0	36,4
Ченстохова (трамвай)	54,8	0,0	45,2
Щецин (трамвай)	41,2	58,8	0,0

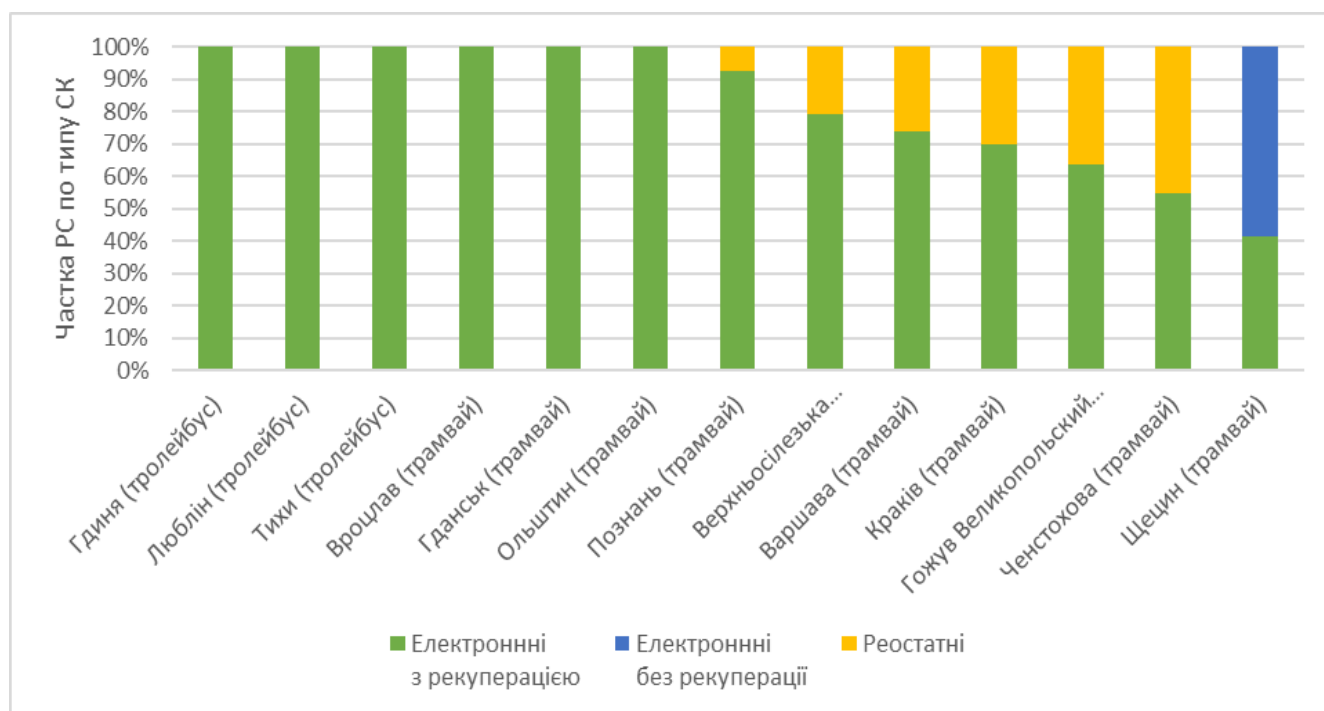


Рисунок 5. Частка рухомого складу по типах систем керування у містах Польщі

Частка енергоефективних електронних систем керування з рекуперацією в тролейбусних системах уже досягла 100%. У трамвайних системах більшості міст цей показник ще не є максимальним, але досить високий. Єдине місто, де менше 50% трамваїв оснащені такими системами, – Щецин. Втім, це компенсується тим, що решта рухомого складу також має електронні системи керування, хоч і без рекуперації. Це пояснюється тим, що значна частина

трамваїв була закуплена в модернізованому вигляді з німецьких міст. Їхня повторна модернізація недоцільна, тому вони поступово замінюються на повністю нові вагони.

Підсилюючі лінії

Підсилюючі лінії є поширеною практикою в європейських містах з трамвайним рухом (рис. 6-8) для зменшення втрат у тяговій мережі. Це дозволяє не лише забезпечити термічну стійкість контактної мережі та підтримувати стабільний рівень напруги, а й **зменшувати втрати електроенергії**. Про використання цього підходу для зменшення втрат свідчить те, що підсилюючі лінії застосовуються по всій довжині ділянок живлення (рис. 7), а не лише в найбільш навантажених зонах поблизу пунктів живлення.

Використання підсилення для трамваю обумовлене більшими струмами рухомого складу та відносною простотою влаштування.

Найбільш поширеними способами влаштування підсилення на трамвайних лініях є:

- **паралельне підвішування** 1-2 провідників на кронштейнах над узбіччям або на тих самих поперечинах, що й контактного проводу (рис. 6-7);
- **поздовжньо-ланцюгова підвіска** з несучим тросом як підсилювачем (рис. 8). Такий спосіб прийшов у трамвай від важкої залізниці. Одночасно з підсиленням поздовжньо-ланцюгова підвіска може забезпечувати більшу щільність точок кріплення контактного проводу, що покращує якість знімання струму, зменшує знос проводів та вартість влаштування за рахунок кількості опор. Однак вона є більш складною в обслуговуванні та регулюванні.



Рисунок 6. На фото із Цюриха, Швейцарія (карти Google [4]), окрім контактних дротів обох напрямків, підвішено підсилюючу дводротову лінію. Вона з'єднана з контактними проводами **еквіпотенціальною перемичкою**.



Рисунок 7. На фото з Амстердаму, Нідерланди [4], зображено секціонування контактної мережі в кінці ділянок живлення суміжних підстанцій. Окрім секційних ізоляторів контактних дротів, також видно розріз підсилюючої дводрової лінії, яка доходить до самого кінця ділянок живлення.



Рисунок 8. На фото з Мюнхену, Німеччина [4], видно поздовжньо-ланцюгову підвіску контактної мережі, де поздовжні несучі троси одночасно виконують роль підсилюючих ліній.

Підсилення тролейбусних ліній майже не використовується. Це зумовлено меншими навантаженнями цього виду транспорту і, відповідно, нижчими втратами. Крім того, таке облаштування є складнішим та дорожчим, оскільки вимагає підтримання полярності «+» та «-», на відміну від трамвая, де достатньо лише «+» (підсилення рейкового кола виконується у дуже виняткових випадках). Окремі випадки облаштування, як в Європі, так і в Україні, пов'язані виключно з критичною технічною потребою для довгих ділянок (рис. 9) або завантажених ліній з одностороннім рухом (рис. 10).



Рисунок 9. На фото з Чеських Будейовиць, Чехія [4], зображено поздовжньо-ланцюгову підвіску тролейбусної лінії. Тут поздовжні несучі троси виконують роль підсилюючої лінії для забезпечення нормальних рівнів напруги та струмів короткого замикання на довгій приміській лінії.



Рисунок 10. На фото з Будапешту, Угорщина [4], зображено **підсилюючу мережу** (зверху), яка дублює контактну (знизу) для забезпечення нормальної густини струму на односторонній ділянці.

Підвищення напруги

Електротранспортні системи Європи історично мають різні рівні номінальних напруг контактної мережі, переважно **600 В та 750 В**. Обладнання контактних і кабельних мереж, а також рухомого складу для цих рівнів напруг не має принципових відмінностей і частково може бути адаптоване.

Вища напруга для міського електротранспорту дає змогу або **зменшити втрати**, або **забезпечити роботу більшої кількості/більшої довжини рухомого складу з меншими капіталовкладеннями**.

Так, у Берліні ще у 1992 році було прийнято стратегічне рішення про переведення трамвайної мережі на вищу напругу. З того моменту новий рухомий склад закуповувався з можливістю роботи на підвищеній напрузі, а під час модернізації підстанцій встановлювалося обладнання, що могло бути переключене з 600 В на 750 В. Планомірна робота в результаті дала змогу у 2023 році переключити мережу на вищу напругу [12].

На жаль, в Україні необґрунтовано жорсткі норми поки що не дозволяють підприємствам змінити номінальну напругу, яка встановлена на рівні 600 В. Це відбувається попри те, що виробники обладнання тягових підстанцій виготовляють обладнання під інші рівні напруги, і є досвід експлуатації вживаного рухомого складу, що раніше працював у мережах 750 В.

Накопичувачі на підстанціях

Використання енергії рекуперації

Використання енергії рекуперації в традиційній тяговій мережі постійного струму можливе лише за наявності споживача в межах ділянки, що живиться від однієї підстанції. Це пов'язано з тим, що традиційний випрямляч може передавати енергію тільки в одному напрямку: від загальної мережі змінного струму до тягової мережі постійного струму.

Для завантажених мереж це не є великою проблемою, оскільки ймовірність збігу режиму рекуперації на одній одиниці рухомого складу та режиму тяги на іншій досить висока. Однак зі зменшенням інтенсивності руху ця ймовірність падає, і частина енергії вимушено втрачається.

Підвищення ефективності рекуперації

Одним зі способів підвищення ефективності використання енергії рекуперації є **встановлення буферних накопичувачів** на тягових підстанціях.

Наприклад, у місті Золінген (Німеччина) з 2018 року реалізовується амбітний проєкт зі збільшення електрифікації міського транспорту. Там побудована «розумна тролейбусна система», однією зі складових якої є **управління навантаженнями**, зокрема в тяговій мережі, для уникнення перевантажень та максимально ефективного використання енергії [5]. Одним з компонентів цієї системи є встановлення **стаціонарних акумуляторних батарей** (рис. 11).

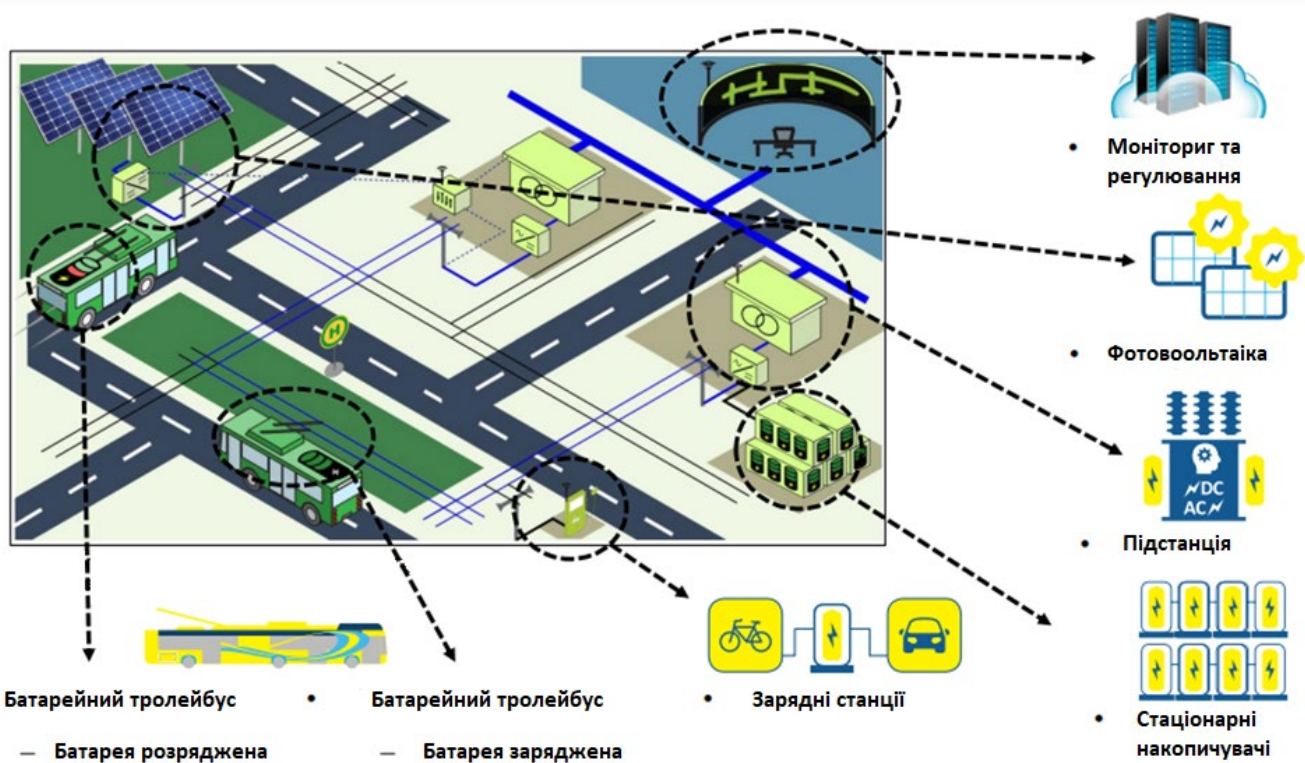


Рисунок 11. Схема «розумної тролейбусної мережі» міста Золінген, Німеччина. Для повного використання енергії рекуперації та покриття пікових навантажень тут використовуються стаціонарні акумуляторні батареї.

У 2011 році в місті Гдиня (Польща), де функціонує тролейбусний рух, компанія-перевізник спільно з Traction Department of Electrotechnical Institute in Warsaw провели експеримент зі встановлення **суперконденсаторів** на найбільш завантаженій тяговій підстанції [6] (рис. 12). За звичайної схеми роботи мережі енергія рекуперації споживалася лише іншим рухомим складом, який перебував у режимі тяги (рис. 13-14).



Рисунок 12. Експериментальний блок суперконденсаторів. 1 – суперконденсатори сумарною ємністю 0,7 кВт·год, 2 – DC/DC перетворювач потужністю 150 кВт, 3 – пристрій захисту та фільтри.

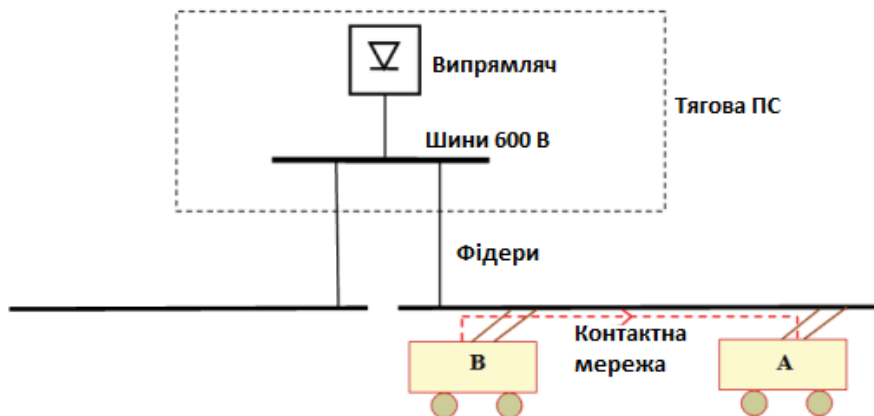


Рисунок 13. Схема перетоку енергії рекуперації від тролейбуса, що гальмує (В), до тролейбуса, що перебуває в режимі тяги (А), за умови їх перебування на одній ділянці контактної мережі. Електроенергія в такому випадку перетікає напряму через контактну мережу з найменшими втратами.

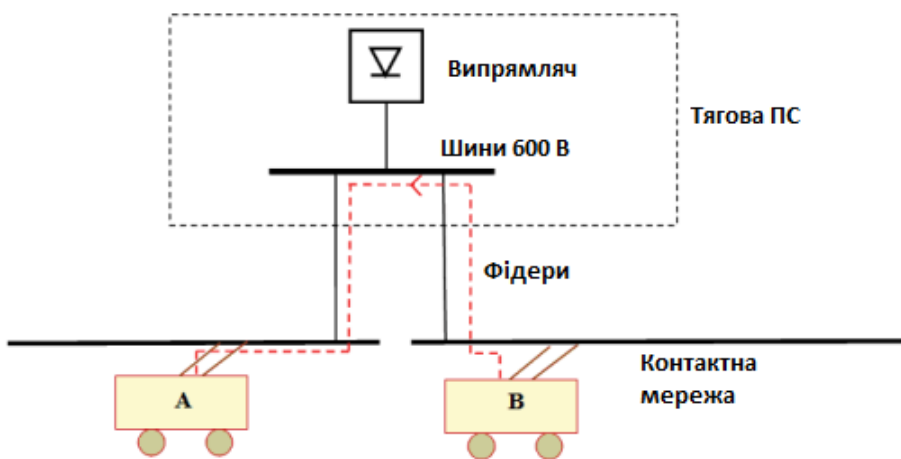


Рисунок 14. Схема перетоку енергії рекуперації від тролейбуса, що гальмує (В), до тролейбуса, що перебуває в режимі тяги (А), за умови їх перебування на різних ділянках контактної мережі в межах зони однієї тягової підстанції. Електроенергія перетікає через контактну та кабельну мережу, що збільшує втрати, але забезпечує споживання рекуперованої енергії.

За відсутності рухомого складу в режимі тяги енергія рекуперації не може бути спожита (рис. 15) і розсіюється на гальмівних резисторах, що призводить до втрат.

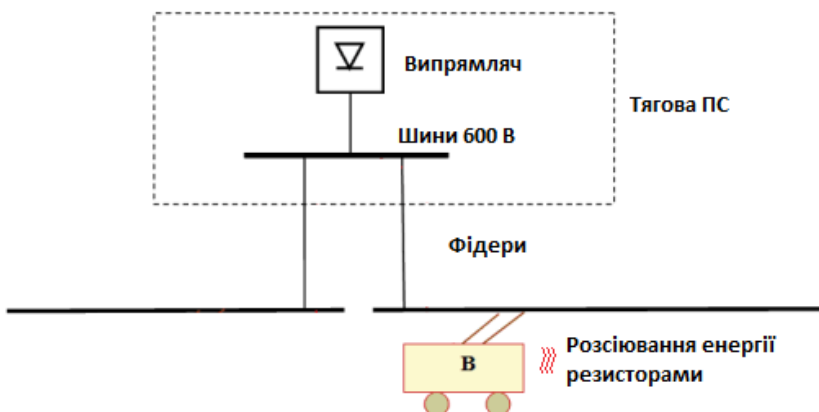


Рисунок 15. Схема перетоку енергії рекуперації від тролейбуса, що гальмує (В) у випадку відсутності споживачів та накопичувачів. Енергія розсіюється на гальмівних резисторах у вигляді тепла і є по суті втраченою.

Після встановлення накопичувача із суперконденсаторами, за відсутності рухомого складу в режимі тяги, **енергія рекуперації перетікає до нього** (рис. 16) і споживається пізніше, коли з'являється рухомий склад у режимі тяги.

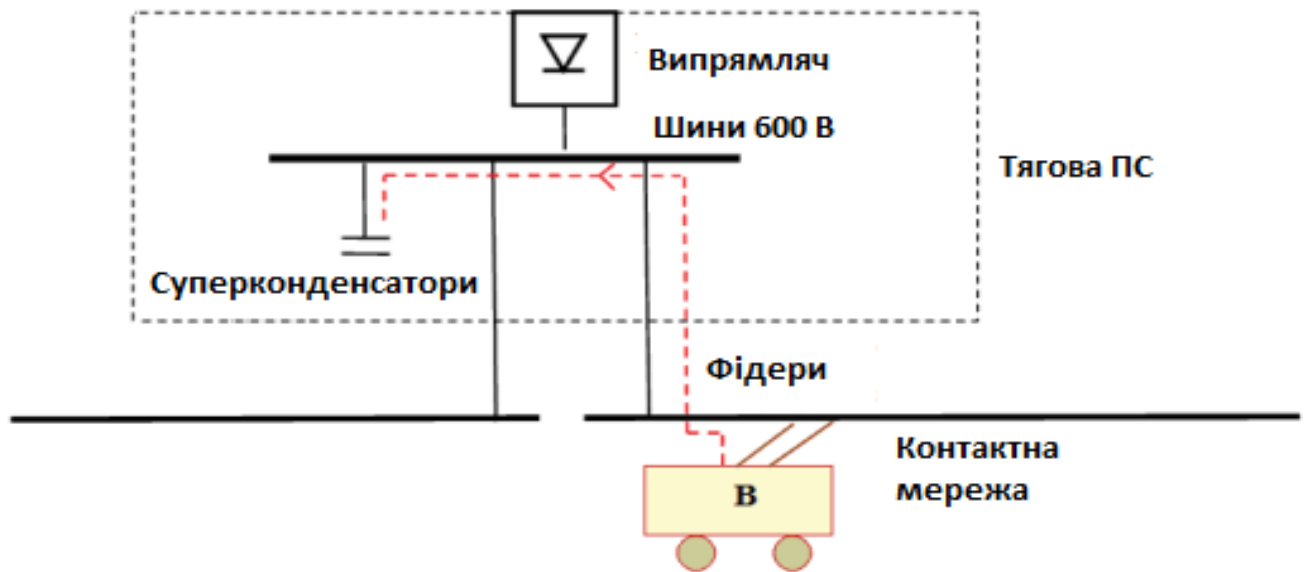


Рисунок 16. Схема перетоку енергії рекуперації від тролейбуса, що гальмує (В) до накопичувача встановленого на тяговій підстанції. Перетік супроводжується втратами у контактній та кабельній мережі, але дозволяє використати енергію.

В результаті експерименту було визначено, що частка енергії, яка потрапляла у накопичувач, становила 3,5-11%, залежно від погодних умов (тобто роботи опалення чи кондиціонерів). Також експеримент підтвердив: ефективність використання енергії рекуперації безпосередньо в мережі зростає зі збільшенням інтенсивності руху (рис. 17).

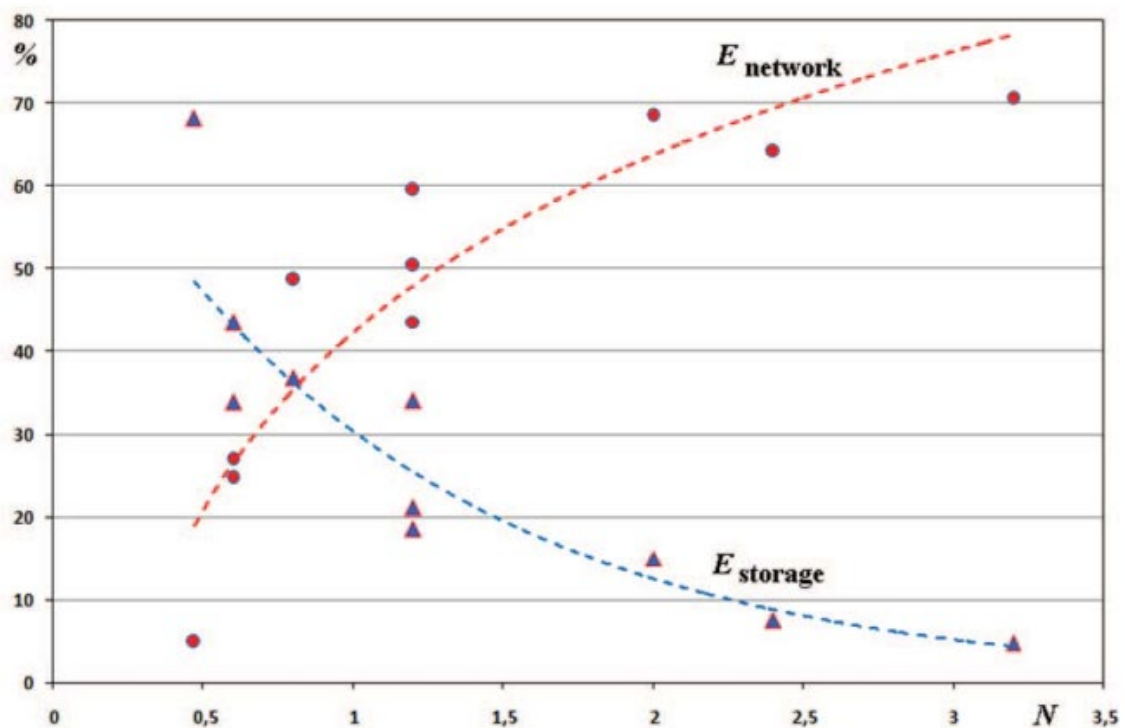


Рисунок 17. Співвідношення між середньою кількістю транспортних засобів (N) на окремих ділянках та значеннями енергії споживання з мережі ($E_{network}$) та збереженої у накопичувачі енергії ($E_{storage}$) відносно всієї рекуперованої.

Висновки авторів дослідження підтвердили загальні тенденції: **рекуперативне гальмування транспортних засобів дозволяє значно заощадити споживання електроенергії – до 35%**. Використання накопичувачів енергії в аналізованому випадку призвело до зниження споживання енергії на 15%.

Економія енергії в результаті використання батареї суперконденсаторів сильно залежить від умов експлуатації. У місті Гдиня на момент експерименту лише 50% усіх тролейбусів були оснащені системами керування з рекуперацією. Зі збільшенням кількості рухомого складу (РС) з рекуперацією зростає й ефект економії при застосуванні системи зберігання енергії.

Порівняння витрат електроенергії на перевезення одного пасажир

Витрати електроенергії є однією з основних складових, що впливають на **вартість перевезення пасажир**. Для оцінки загальної ситуації в досліджуваних містах України в **табл. 2** розраховано **витрати на одного пасажир** на основі інформації про загальні витрати електроенергії та кількості перевезених пасажирів у 2023 році [1]. Вартість електроенергії на перевезення одного пасажир наведена в поточних цінах.

Таблиця 2. Витрати електроенергії на перевезення одного пасажир та її вартість.

Місто	Витрати ЕЕ на тягу, кВт*год/рі	Пасажиропотік, пас/рік	Витрати ЕЕ на пасажир, кВт*год/пас	Вартість ЕЕ*, грн./пас
Вінниця	24 579 862	41 918 000	0,586	5,11
Дніпро	38 649 647	54 795 600	0,705	6,15
Житомир	8 473 300	32 373 700	0,262	2,28
Запоріжжя	10 913 922	24 959 000	0,437	3,81
Івано-Франківськ	5 005 806	8 220 300	0,609	5,31
Кам'янське	5 280 000	12 114 000	0,436	3,80
Конотоп	928 300	2 585 000	0,359	3,13
Луцьк	4 859 243	16 323 500	0,298	2,60
Львів	25 997 758	105 959 800	0,245	2,14
Миколаїв	7 305 283	20 025 600	0,365	3,18
Одеса	22 143 200	108 369 100	0,204	1,78
Полтава	6 922 400	19 240 000	0,360	3,14
Рівне	6 030 580	21 242 500	0,284	2,48
Суми	4 203 178	8 914 200	0,472	4,11
Хмельницький	8 471 736	15 557 700	0,545	4,75
Чернівці	6 776 909	13 932 100	0,486	4,24
Чернігів	6 829 868	22 179 000	0,308	2,69

* Ціна на е.е. на 01.12.2024 = середньозважена РДН + тариф ОСП + середній тариф ОСР

На рисунку 18 **рейтинг досліджуваних підприємств за витратами електроенергії на одного пасажир** також відображає питомі витрати електроенергії на 1 км пробігу. На ньому видно, що, всупереч очікуванням, залежності між цими показниками немає.

Варто зауважити, що **витрати електроенергії на одного пасажир** є хорошим показником для економічного порівняння електротранспортних систем. Однак він не є абсолютно показовим з технічної точки зору роботи енергогосподарства та рухомого складу. Це пов'язано з тим, що на цей показник дуже сильно впливає середня довжина поїздки, яка є наслідком поведінки пасажирів, що, своєю чергою, залежить від тарифів на проїзд та географічної структури міста.

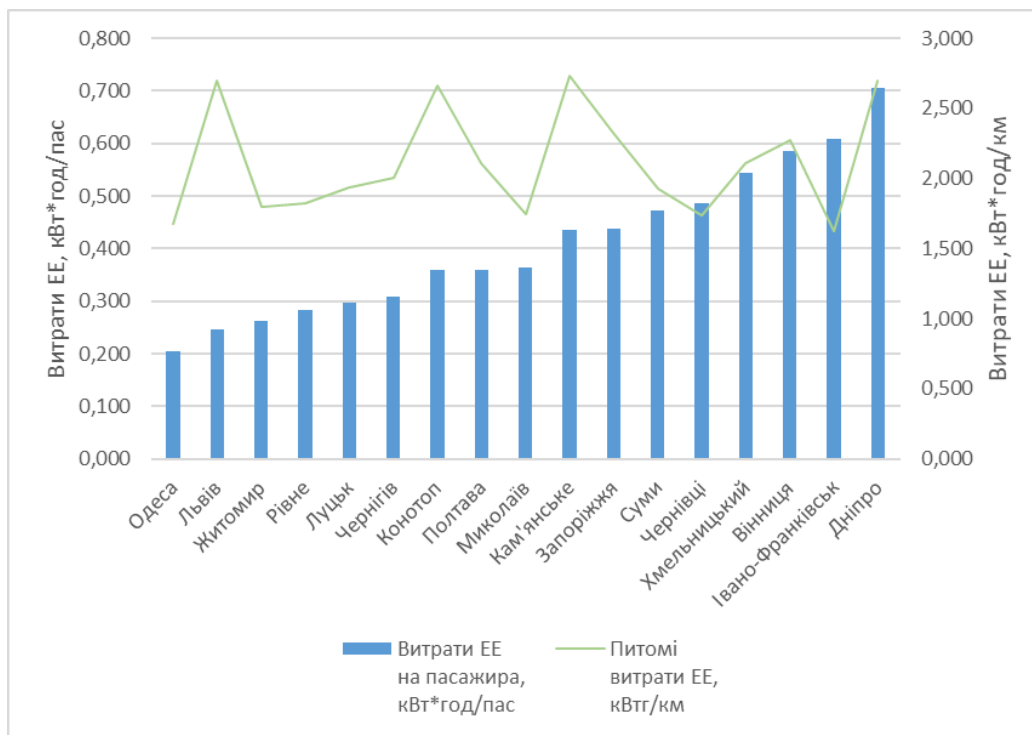


Рисунок 18. Рейтинг підприємств за витратами електроенергії на одного пасажирів.

Порівняння витрат на тягу

Оцінка впливу типу рухомого складу з різними системами керування в Україні

Оцінку впливу типу рухомого складу з різними системами керування на загальне споживання електроенергії проведено шляхом порівняння:

- загальних витрат електроенергії по містах, що увійшли в дослідження (табл. 3);
- загального пробігу рухомого складу (табл. 4);
- загальної кількості рухомого складу за типами систем керування (табл. 5);
- його частки у структурі парку (табл. 6).

Для цієї оцінки використано реальну, а не умовну кількість рухомого складу, що перебував в експлуатації. Такий підхід є прийнятним, враховуючи, що протягом усього періоду дослідження зміни структури парку трамваїв за довжиною та тролейбусів за типом кузова (одинарні/зчленовані) майже не відбулися. Натомість оцінка в реальних одиницях полегшить визначення як наявної тенденції, так і подальших потреб у заміні.

Таблиця 3. Витрати електроенергії на тягу по містах України, МВт·год

Місто	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Вінниця	28 598,3	30 068,4	30 538,5	30 598,0	28 617,7	28 291,7	25 577,5	27 850,2	22 895,5	22 223,2
Дніпро	41 017,0	46 763,6	49 044,7	45 354,7	45 490,0	42 645,0	41 233,6	44 181,5	35 239,2	32 856,7
Житомир	10 738,5	12 150,3	13 228,8	13 348,0	13 385,9	12 712,2	10 342,0	10 501,7	7 243,5	6 660,1
Запоріжжя	26 839,5	23 328,1	24 418,1	19 276,2	16 190,3	14 351,0	14 397,9	15 027,4	10 758,4	7 893,8
Івано-Франківськ	2 942,5	2 943,5	3 270,5	3 365,0	3 636,7	3 572,9	3 138,2	3 942,0	3 632,2	4 293,5
Кам'янське	4 179,0	4 153,0	4 085,0	5 622,0	6 055,0	5 914,0	5 164,0	5 576,0	4 281,0	4 074,0
Конотоп*	1 903,6	2 036,8	1 782,2	1 702,5	1 317,9	1 560,4	1 499,4	1 587,4	934,5	928,3
Луцьк	4 963,5	6 583,7	7 545,6	6 822,6	6 779,5	6 522,9	4 577,4	5 552,4	4 208,9	4 394,4
Львів	21 796,8	22 437,2	21 978,1	19 698,5	20 984,6	20 376,0	20 246,7	21 541,2	21 357,9	22 378,8
Миколаїв	7 234,5	7 603,7	9 464,6	8 693,7	8 412,2	9 045,6	8 199,2	8 355,4	5 118,6	5 671,4
Одеса	28 371,9	29 971,6	28 994,0	26 971,5	26 624,4	26 955,8	25 570,4	26 516,7	17 461,2	18 270,8
Рівне	5 205,5	6 401,4	6 685,2	6 535,5	6 788,0	6 075,1	5 039,0	6 074,8	5 916,9	5 688,3
Полтава	8 489,7	8 637,3	8 498,2	7 905,9	7 887,6	7 280,4	7 077,4	6 692,9	5 714,0	6 093,9
Суми	5 632,3	5 868,0	5 316,7	5 691,7	6 138,7	6 246,5	5 013,4	5 802,6	3 171,1	3 498,0
Хмельницький	10 581,1	10 471,5	10 152,1	9 422,5	9 151,8	9 060,2	8 504,0	8 676,2	7 141,3	7 348,6
Чернівці	6 579,6	6 381,0	5 814,5	5 442,8	6 825,0	6 365,0	5 604,3	6 103,1	5 550,4	5 717,5
Чернігів	10 180,6	9 592,9	9 311,3	9 017,6	8 944,2	8 513,9	7 484,4	7 726,2	4 433,9	6 016,1
Разом	225 254	235 392	240 128	225 469	223 229	215 489	198 669	211 708	165 059	164 007

* Значення витрат електроенергії за 2014-2015 роки по Конотопу розрахункові, у зв'язку з тим, що замір відсутній.

Таблиця 4. Пробіг рухомого складу (об'єм транспортної роботи) по містах України, тис. км.

Місто	Вид транспорту	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Вінниця	Т	3494,3	3411,5	3268,7	3261,1	3136,8	3227,7	3208,5	3343,8	2836,7	2832,4
Вінниця	Тр	6879,4	7276,0	7112,5	6721,2	6577,2	6482,7	6386,1	6446,0	5804,2	6200,6
Дніпро	Т	9239,5	10819,2	11416,6	10555,1	9546,0	9375,6	9276,8	9896,7	8038,6	7267,4
Дніпро	Тр	3740,1	4266,4	4470,8	4594,7	5249,2	5714,7	5824,3	6381,4	5733,2	5561,6
Житомир	Т	668,6	672,4	656,9	651,2	608,0	609,6	556,1	513,2	288,7	273,8
Житомир	Тр	3627,1	4416,4	4671,9	4414,6	4122,4	4031,0	3515,0	3887,1	2825,4	3250,0
Запоріжжя	Т	4183,9	3975,1	4089,1	3257,9	2843,5	2911,4	2774,7	2846,2	1923,0	1931,9
Запоріжжя	Тр	3009,0	2603,0	2440,7	2253,1	1980,5	1969,1	2126,7	2068,9	1501,0	1287,4
Івано-Франківськ	Тр	1580,9	1592,1	1722,2	1705,0	1728,8	1746,8	1560,2	2091,3	2033,6	2219,5
Кам'янське	Т	1201,1	1175,5	1239,7	1797,5	1618,4	1596,7	1638,9	1650,4	1443,3	1519,3
Конотоп	Т	547,6	585,9	524,0	531,5	347,4	493,5	628,6	614,9	381,1	356,7
Луцьк	Тр	2093,8	2710,9	2931,7	2756,2	2761,4	2750,1	2023,5	2510,3	2058,9	2293,6
Львів	Т	3352,8	3339,4	3307,9	3308,0	3239,9	3660,2	3757,5	3792,0	3560,3	3756,8
Львів	Тр	2832,1	2856,8	2841,1	2863,2	2858,0	2803,0	3037,0	3386,9	3531,6	3500,1
Миколаїв	Т	1593,2	1607,7	1787,5	1802,3	1907,8	2014,6	1828,0	1823,3	1198,5	1378,8
Миколаїв	Тр	1390,9	1730,2	2439,4	2620,3	2462,6	2571,3	2422,8	2362,6	1582,8	1882,6
Одеса	Т	7286,4	8208,2	8112,8	7763,7	7861,7	8480,7	8660,9	8418,2	5191,1	6342,7
Одеса	Тр	4723,2	4973,5	4676,8	4663,6	4680,7	5722,2	5137,7	6020,0	3833,2	4775,3
Полтава	Тр	3224,7	3240,3	3212,2	3221,2	3058,8	3106,8	3296,0	3535,0	3105,0	3347,0
Рівне	Тр	2459,3	2904,3	3032,6	3017,2	2968,8	2959,3	2690,9	2760,1	2595,1	2676,0
Суми	Тр	2178,2	2302,2	2168,4	2280,0	2608,2	2523,2	2212,8	2641,3	1590,1	1812,6
Хмельницький	Тр	4070,4	4179,5	4212,4	3964,7	3909,2	3970,7	4082,8	4035,4	3323,8	3481,7
Чернівці	Тр	3068,2	2947,4	2668,9	2560,7	2863,8	2630,2	2733,5	2813,7	3003,4	2884,3
Чернігів	Тр	4174,8	4002,3	3994,0	4023,5	3773,5	3845,2	3669,2	3766,9	1871,8	3028,7
Разом Т	Т	31567,4	33794,9	34403,2	32928,3	31109,5	32370,1	32329,9	32898,7	24861,2	25659,9
Разом Тр	Тр	49052,1	52001,3	52595,6	51659,2	51603,1	52826,3	50718,5	54707,0	44393,1	48201,2
Разом		80619,5	85796,2	86998,8	84587,6	82712,5	85196,5	83048,4	87605,7	69254,4	73861,1

Таблиця 5. Кількість рухомого складу в експлуатації по містах України

Місто	Вид транспорту	Система керування	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Вінниця	Т	РК	132	131	125	119	118	118	118	118	92	92
Вінниця	Т	ЕС	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
Вінниця	Т	ЕР	0	1	3	8	10	10	10	10	10	10
Вінниця	Тр	РК	102	102	99	99	99	99	89	79	79	50
Вінниця	Тр	ЕР	45	45	45	45	45	48	51	59	61	87
Дніпро	Т	РК	136	136	136	135	115	103	89	80	80	80
Дніпро	Т	ЕС	124	124	124	124	124	144	164	174	174	174
Дніпро	Тр	РК	124	124	124	110	98	88	88	88	88	88
Дніпро	Тр	ЕР	1	12	19	29	52	68	93	97	97	97
Житомир	Т	РК	32	32	30	30	25	25	25	23	23	23
Житомир	Тр	РК	122	122	107	107	84	84	84	70	68	67
Житомир	Тр	ЕС	12	31	32	32	32	32	32	26	26	25
Житомир	Тр	ЕР	6	6	6	6	6	6	43	56	56	56
Запоріжжя	Т	РК	77	77	71	71	65	61	61	53	50	50
Запоріжжя	Т	ЕС	49	49	49	49	61	62	62	74	79	79
Запоріжжя	Т	ЕР	0	0	0	0	6	10	10	10	10	10
Запоріжжя	Тр	РК	82	85	74	52	27	21	19	13	13	13
Запоріжжя	Тр	ЕС	3	0	4	5	5	9	14	14	14	14
Запоріжжя	Тр	ЕР	11	17	17	17	17	22	21	20	20	20
Івано-Франківськ	Тр	РК	10	9	9	4	4	2	2	2	1	0
Івано-Франківськ	Тр	ЕС	30	32	40	44	44	41	41	43	39	36
Івано-Франківськ	Тр	ЕР	5	5	5	5	5	22	22	34	34	34
Кам'янське	Т	РК	46	46	46	26	28	28	33	23	22	19
Кам'янське	Т	ЕС	6	6	6	6	6	6	6	14	14	13
Конотоп	Т	РК			13	13	13	9	6	6	6	7
Конотоп	Т	ЕС			1	1	1	1	1	1	1	1
Конотоп	Т	ЕР			0	0	0	3	6	6	6	6
Луцьк	Тр	РК	56	52	51	51	46	41	40	34	26	28
Луцьк	Тр	ЕС	1	6	7	7	7	7	3	3	2	2
Луцьк	Тр	ЕР	7	7	7	7	7	7	9	19	36	38
Львів	Т	РК	96	95	95	95	95	69	69	69	69	69
Львів	Т	ЕС	27	27	27	27	36	57	57	57	57	57
Львів	Т	ЕР	2	2	9	9	9	9	9	9	15	17
Львів	Тр	РК	27	13	13	13	13	5	5	5	4	4
Львів	Тр	ЕС	56	46	46	46	46	42	42	42	37	37
Львів	Тр	ЕР	15	15	19	24	24	44	74	74	74	74
Миколаїв	Т	РК	30	30	30	30	30	30	30	30	28	28
Миколаїв	Т	ЕС	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Миколаїв	Т	ЕР	6	16	18	18	18	18	18	18	18	18
Миколаїв	Тр	РК	19	19	17	17	17	17	17	11	7	7
Миколаїв	Тр	ЕС	0	26	33	33	33	33	33	17	16	14
Миколаїв	Тр	ЕР	11	11	11	11	11	11	11	38	41	47
Одеса	Т	РК	130	123	123	122	84	78	78	78	78	75
Одеса	Т	ЕС	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12
Одеса	Т	ЕР	56	73	73	74	91	97	97	97	97	101
Одеса	Тр	РК	112	111	112	99	84	62	40	59	58	34
Одеса	Тр	ЕС	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Одеса	Тр	ЕР	26	26	31	36	36	83	83	83	83	83
Полтава	Тр	РК	52	52	51	45	44	43	34	25	21	21
Полтава	Тр	ЕР	11	11	11	16	16	16	36	56	56	56
Рівне	Тр	РК	41	36	36	36	25	19	17	17	13	8
Рівне	Тр	ЕС	38	40	51	53	53	52	52	52	51	49
Рівне	Тр	ЕР	1	1	2	5	15	17	20	20	20	20
Суми	Тр	РК	60	54	54	51	49	46	41	40	32	26
Суми	Тр	ЕР	2	14	14	18	22	26	26	45	45	45
Хмельницький	Тр	РК	117	97	97	97	91	86	80	73	63	63
Хмельницький	Тр	ЕР	2	8	11	18	25	35	35	35	35	35
Чернівці	Тр	РК	11	10	10	10	9	8	6	6	4	0
Чернівці	Тр	ЕС	59	58	57	63	68	62	58	58	48	43
Чернівці	Тр	ЕР	10	10	10	10	18	31	32	32	36	39
Чернігів	Тр	РК	91	89	88	78	78	69	57	47	40	32
Чернігів	Тр	ЕР	7	7	17	22	26	34	39	43	43	49

Таблиця 5. Продовження

Разом Т-РК	Т	РК	679	670	669	641	573	521	509	480	448	443
Разом Т-ЕС	Т	ЕС	220	220	221	222	243	285	305	335	340	345
Разом Т-ЕР	Т	ЕР	64	92	103	109	134	147	150	150	156	162
Разом Тр-РК	Тр	РК	1026	975	942	869	768	690	619	569	517	441
Разом Тр-ЕС	Тр	ЕС	207	247	278	291	296	286	283	263	241	228
Разом Тр-ЕР	Тр	ЕР	160	195	225	269	325	470	595	711	737	780
Разом Т	Т		963	982	993	972	950	953	964	965	944	950
Разом Тр	Тр		1393	1417	1445	1429	1389	1446	1497	1543	1495	1449
Разом РК		РК	1705	1645	1611	1510	1341	1211	1128	1049	965	884
Разом ЕС		ЕС	427	467	499	513	539	571	588	598	581	573
Разом ЕР		ЕР	224	287	328	378	459	617	745	861	893	942
Разом			2356	2399	2438	2401	2339	2399	2461	2508	2439	2399

Таблиця 6. Відсоткова частка рухомого складу по системах керування

Вид транспорту	Система керування	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Трамвай	Реостатна	70,5%	68,2%	67,4%	65,9%	60,3%	54,7%	52,8%	49,7%	47,5%	46,6%
Трамвай	Електронна без рекуперації	22,8%	22,4%	22,3%	22,8%	25,6%	29,9%	31,6%	34,7%	36,0%	36,3%
Трамвай	Електронна з рекуперацією	6,6%	9,4%	10,4%	11,2%	14,1%	15,4%	15,6%	15,5%	16,5%	17,1%
Тролейбус	Реостатна	73,7%	68,8%	65,2%	60,8%	55,3%	47,7%	41,3%	36,9%	34,6%	30,4%
Тролейбус	Електронна без рекуперації	14,9%	17,4%	19,2%	20,4%	21,3%	19,8%	18,9%	17,0%	16,1%	15,7%
Тролейбус	Електронна з рекуперацією	11,5%	13,8%	15,6%	18,8%	23,4%	32,5%	39,7%	46,1%	49,3%	53,8%
Разом	Реостатна	72,4%	68,6%	66,1%	62,9%	57,3%	50,5%	45,8%	41,8%	39,6%	36,8%
Разом	Електронна без рекуперації	18,1%	19,5%	20,5%	21,4%	23,0%	23,8%	23,9%	23,8%	23,8%	23,9%
Разом	Електронна з рекуперацією	9,5%	12,0%	13,5%	15,7%	19,6%	25,7%	30,3%	34,3%	36,6%	39,3%

Для зручності оцінки ситуації по Україні, відсоткова частка рухомого складу за системами керування також представлена на рис. 19-21.

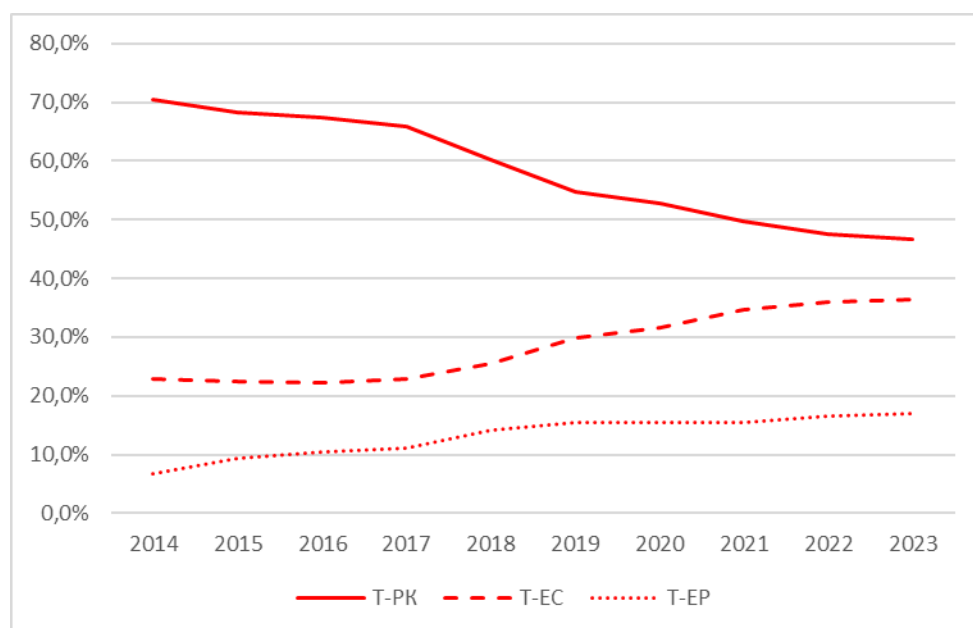


Рисунок 19. Відсоткова частка трамваїв по системах керування.

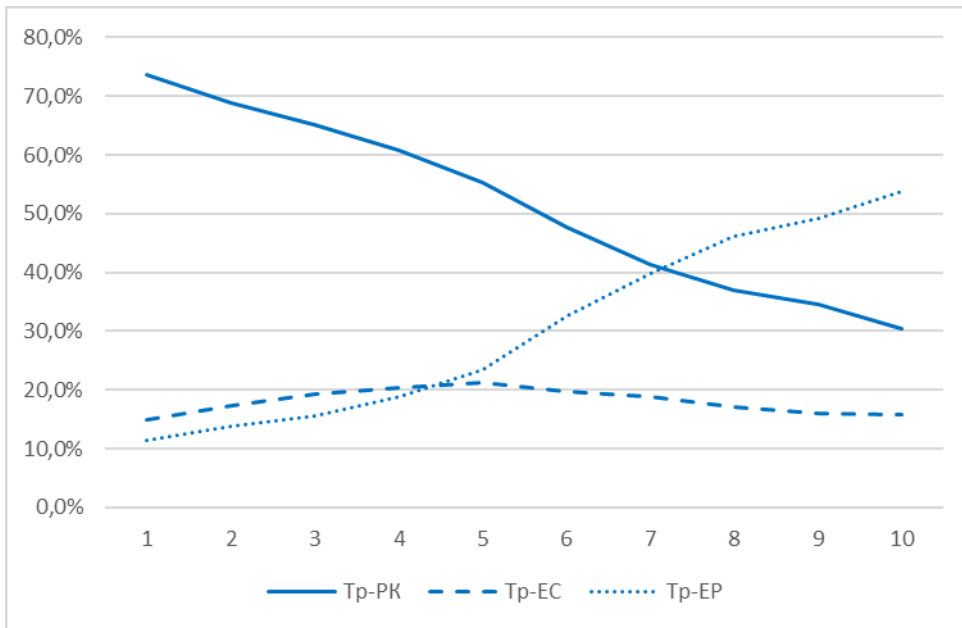


Рисунок 20. Відсоткова частка тролейбусів по системах керування.

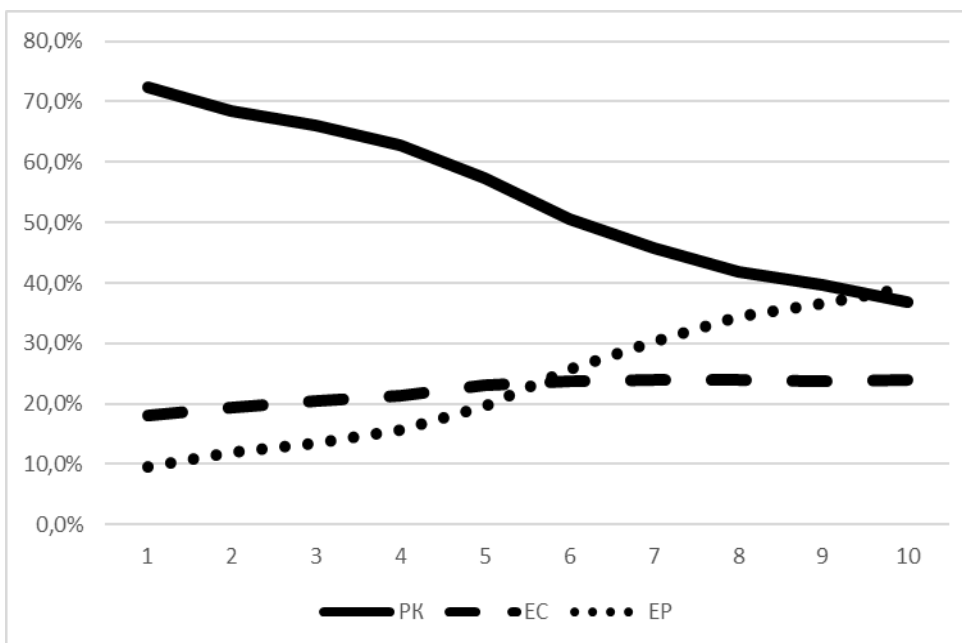


Рисунок 21. Відсоткова частка всього рухомого складу по системах керування.

Зведені на один графік загальні витрати електроенергії по містах, що увійшли в дослідження, загальний пробіг рухомого складу та частка рухомого складу з реостатними системами керування представлені на рис. 22.

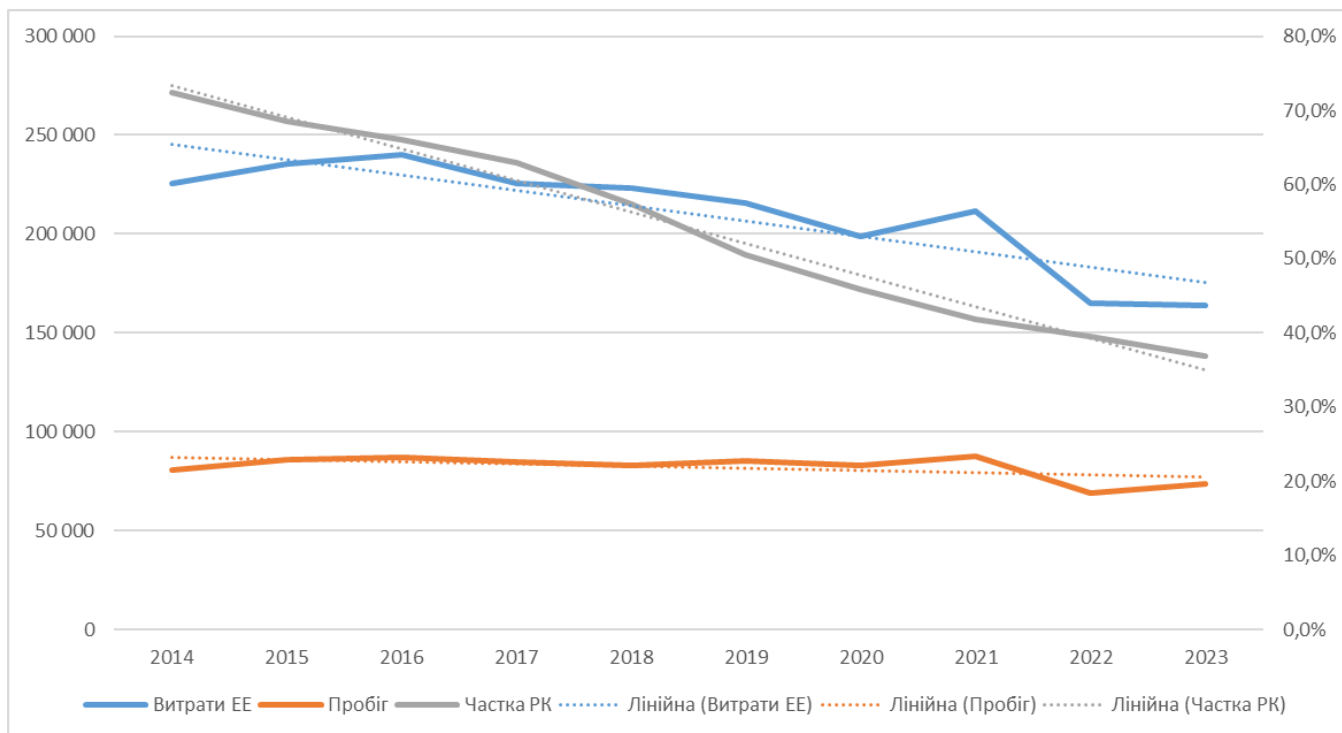


Рисунок 22. Динаміка показників роботи електротранспортних систем України

За 10-річний період сумарні обсяги руху в досліджуваних містах України скоротилися з 80,645 млн км/рік до 73,808 млн км/рік, тобто на 8,5%. Це падіння не є критичним, враховуючи велику кількість міст, що постраждали від повномасштабного вторгнення.

Зокрема:

- Сумарні обсяги руху трамваїв скоротилися з 31,567 млн км/рік до 25,660 млн км/рік, або на 18,7%.
- Сумарні обсяги руху тролейбусів скоротилися з 49,077 млн км/рік до 48,148 млн км/рік, або на 1,9%.

Тобто, основне скорочення відбулося за рахунок зменшення роботи трамваїв.

Витрати електроенергії на тягу за 10 років зменшилися з 225,3 млн кВт·год/рік до 164,0 млн кВт·год/рік, або на 27,2%.

Зменшення витрат електроенергії на тягу значно випереджає зменшення обсягів руху. Це відбувається за рахунок заміни більш енергоємного рухомого складу з реостатними системами керування на вживаний з електронними (без рекуперації або з рекуперацією) або новий з електронними системами та рекуперацією, а також шляхом модернізації.

Частка рухомого складу за типами систем керування змінилася наступним чином:

- реостатні -35,5% (трамваї -23,9%, тролейбуси -43,2%);
- електронні без рекуперації +5,8% (трамваї +13,5%, тролейбуси +0,9%);
- електронні з рекуперацією +29,8% (трамваї +10,4%, тролейбуси +42,3%).

В українських містах споживання енергії рекуперації відбувається виключно іншим рухомим складом у межах ділянок, покритих однією тяговою підстанцією. Якщо таких споживачів немає, енергія "гаситься" гальмівними реостатами. Випадків встановлення накопичувачів на тягових

підстанціях чи інверторних перетворювальних агрегатів на міському електротранспорті не зафіксовано. Це дещо зменшує ефективність рекуперації, особливо на ділянках з малою інтенсивністю руху, де ймовірність збігу рекуперації та великого споживання знижується.

Загальний рейтинг оновлення рухомого складу міст України за показником частки РС з електронною системою керування та рекуперацією зображено на рис. 23

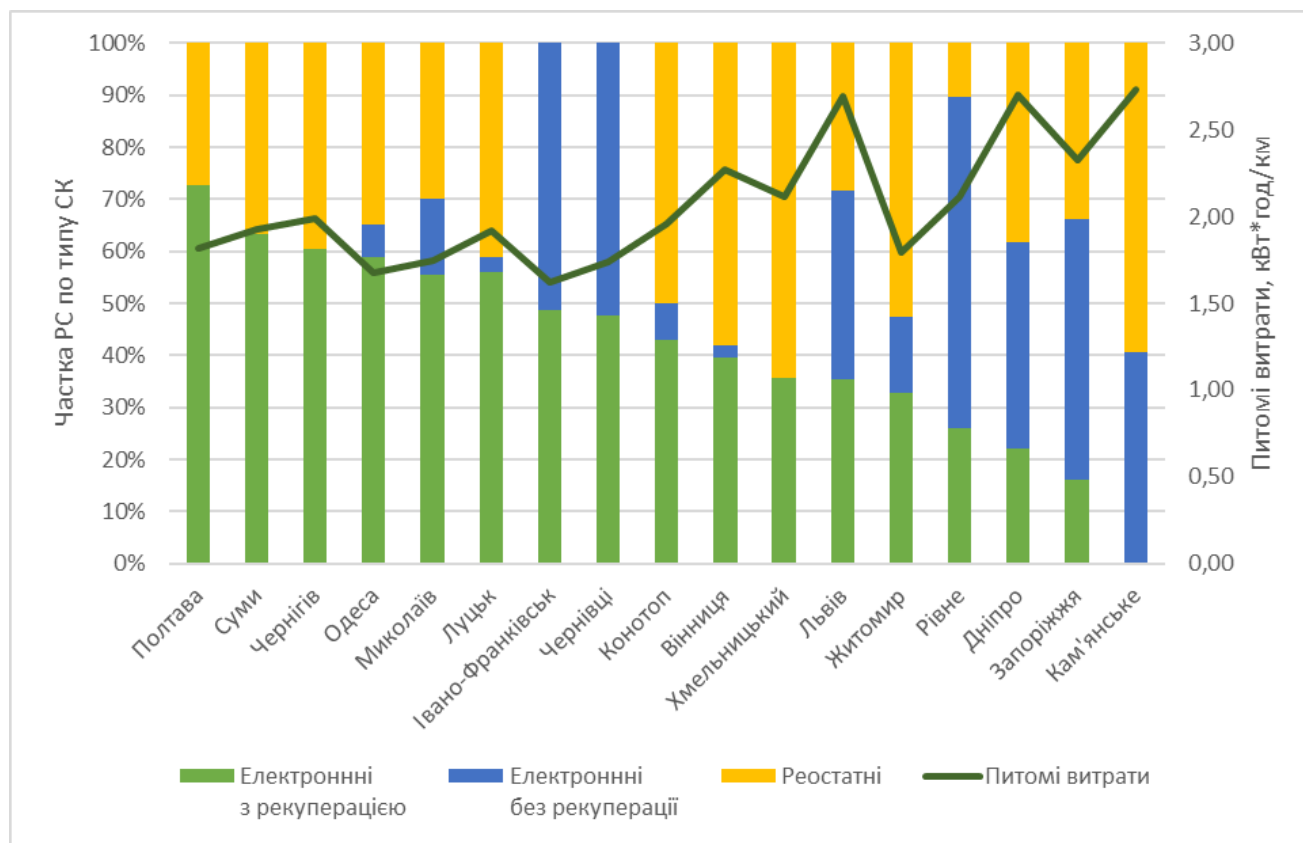


Рисунок 23. Рейтинг деяких електротранспортних систем України за часткою оновлення систем керування рухомого складу станом на 2023 рік.

На рис. 23 помітна залежність: питомі витрати зростають в міру зменшення кількості рухомого складу, оснащеного системами ЕР.

Як вже було відомо з графіків на рис. 19-20, ситуація з оновленням тролейбусів є кращою; на рис. 23 тролейбусні міста розташовуються ближче до початку рейтингу. Але варто відзначити трамвайно-тролейбусні Одесу та Миколаїв. Наприклад, Одеса, яка посідає найвище місце в рейтингу серед міст з трамваєм, має відповідно й один з найнижчих показників питомих витрат електроенергії на 1 км пробігу. Цього досягнуто як купівлею вживаних трамваїв, так і значним обсягом модернізації власних старих.

Проміжний висновок: заміна енергоємного рухомого складу на економічніший була і залишається основним заходом з підвищення енергоефективності підприємств електротранспорту.

Оцінка потенціалу його подальшої заміни буде наведена далі.

Оцінка впливу об'ємів руху на витрати електроенергії на тягу.

Розраховані питомі витрати на тягу для умовних трамваїв та тролейбусів за типами систем керування зведено в табл. 7.

Відповідно до типів систем керування, залежності питомих витрат від коефіцієнтів використання мережі нанесено на графіки розсіювання (рис. 24-29).

Таблиця 7. Питомі витрати на тягу для умовних трамваїв та тролейбусів.

Місто	Трамваї					Тролейбуси				
	Коефіцієнт використання мережі	Питомі витрати, кВт*год/км				Коефіцієнт викорис	Питомі витрати, кВт*год/км			
		РК	ЕС	ЕР	Середнє по підприємству		РК	ЕС	ЕР	Середнє по підприємству
Краків (Польща)	7,67	2,69		2,51	2,59					
Вінниця	9,26	3,07	3,01	2,95	3,06	4,29	3,17		0,99	2,35
Дніпро	5,76	4,33	3,38		3,82	1,50	1,93		1,33	1,44
Житомир	4,18	3,93			3,93	4,64	2,24	2,24	1,14	2,06
Запоріжжя	3,45	3,66	2,37	1,31	2,92	1,33	5,37	2,09	1,33	2,47
Івано-Франківськ						3,55	1,82	1,82	1,33	1,71
Кам'янське	2,15	3,71	1,93		3,31					
Конотоп	2,06	2,87	2,11	1,01	2,43					
Луцьк						2,60	2,56	2,56	1,52	2,32
Львів	6,27	4,30	3,04	2,94	3,80	2,77	2,37	1,92	0,92	1,56
Миколаїв	2,77	3,50	1,60	1,31	2,68	2,07	2,22	1,44	1,23	1,67
Одеса	4,15	2,75	2,20	1,57	2,15	3,81	2,76	2,01	1,09	1,68
Полтава						5,16	2,73		1,51	2,25
Рівне						2,65	2,17	2,17	1,86	2,13
Суми						2,57	2,53		1,64	2,23
Хмельницький						2,25	2,60		1,24	2,30
Чернівці						4,04	2,91	2,20	1,20	1,99
Чернігів						3,88	2,45		1,76	2,23
Середньозважене по Україні		3,60	2,70	2,24	3,22		2,60	2,07	1,33	2,04

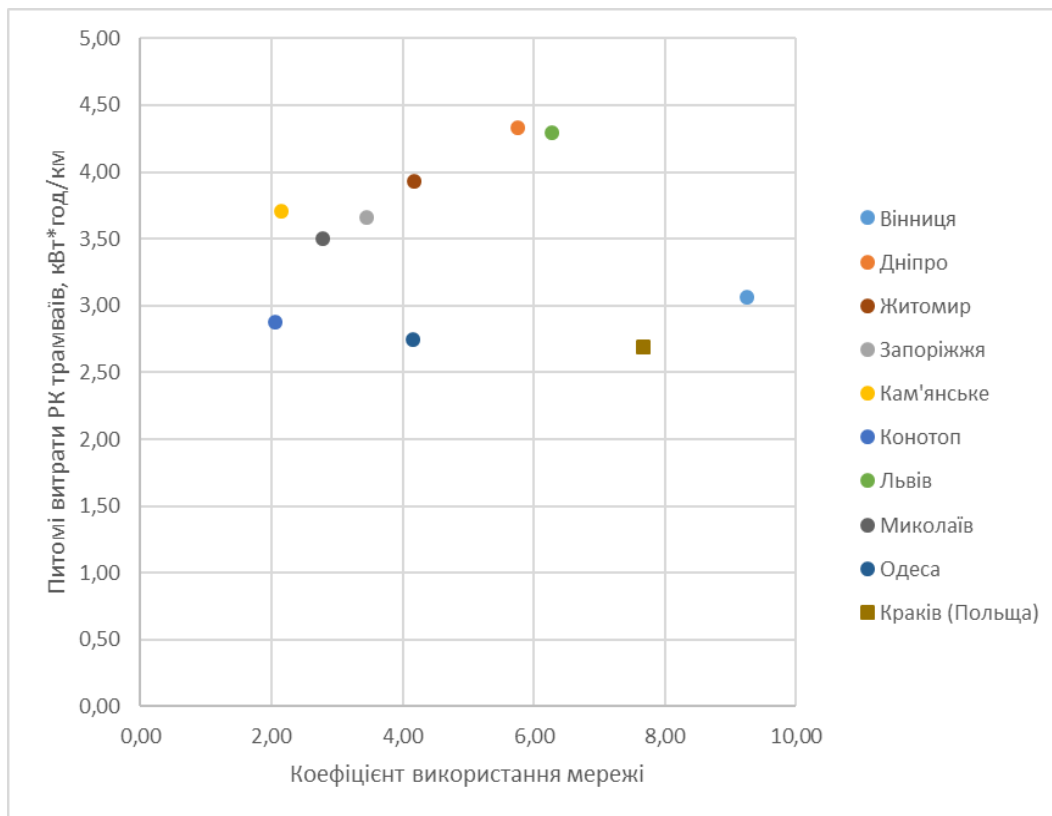


Рис. 24. Графік розсіювання питомих витрат на тягу трамваїв з реостатними системами керування залежно від коефіцієнта використання мережі.

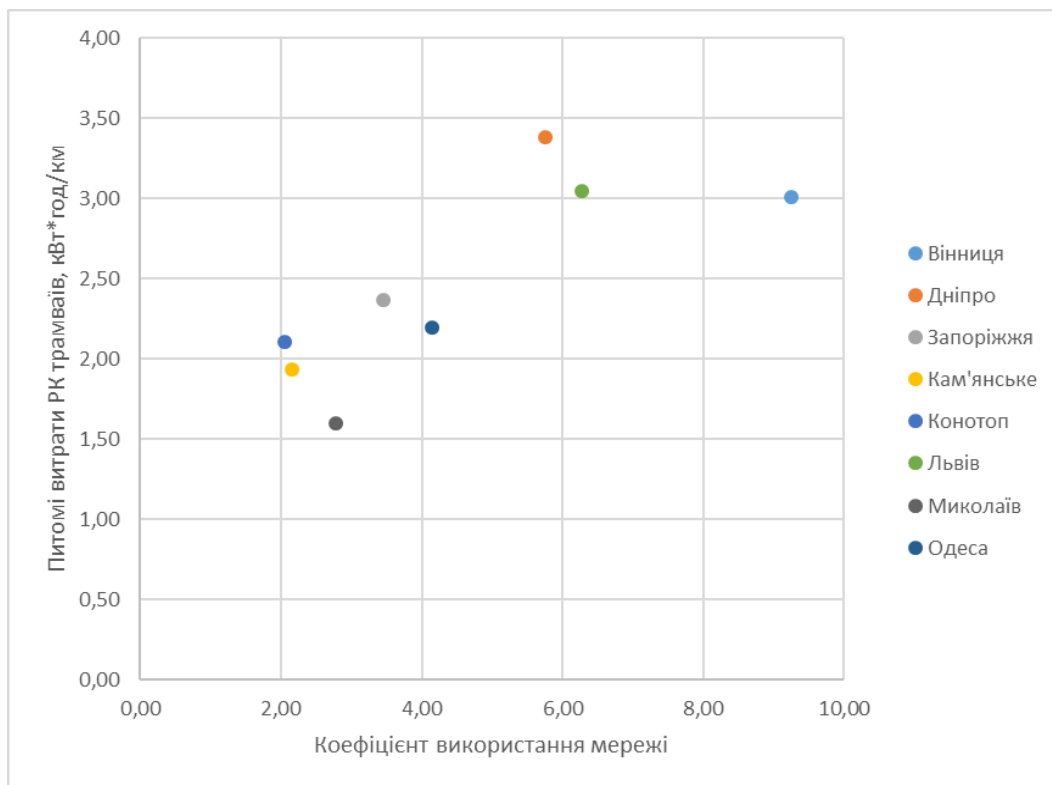


Рис. 25. Графік розсіювання питомих витрат на тягу трамваїв з електронними системами керування без рекуперації залежно від коефіцієнта використання мережі.

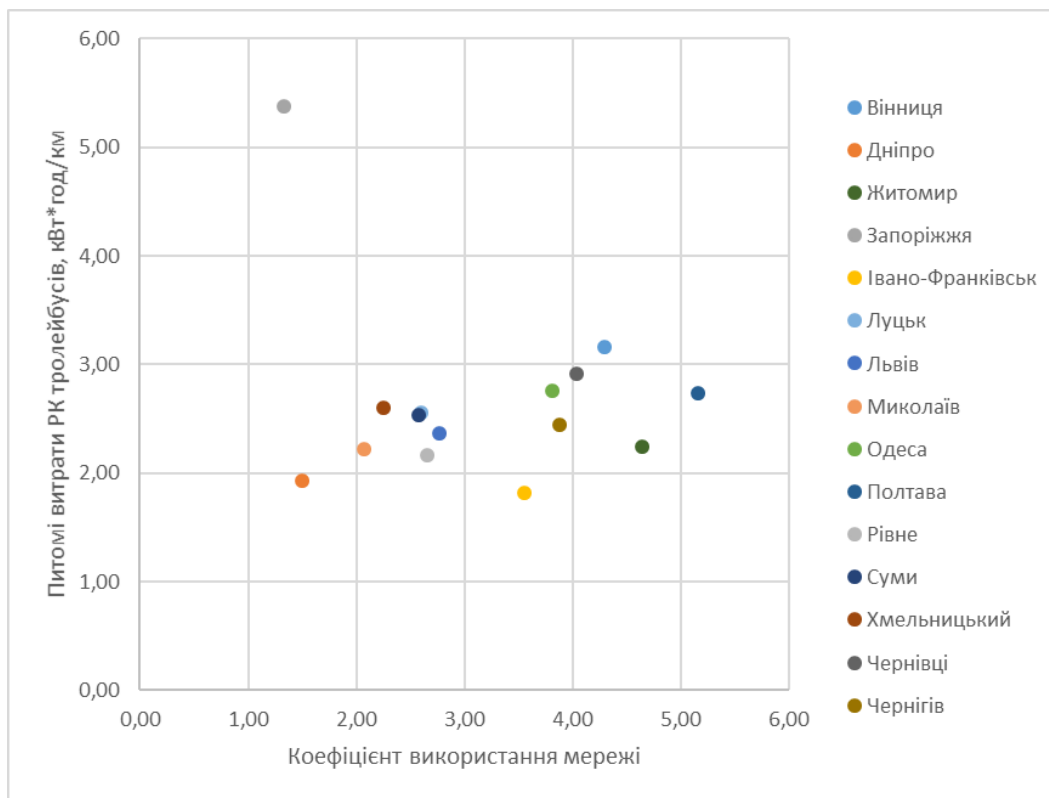


Рисунок 26. Графік розсіювання питомих витрат на тягу трамваїв з електронними системами керування з рекуперацією залежно від коефіцієнта використання мережі.

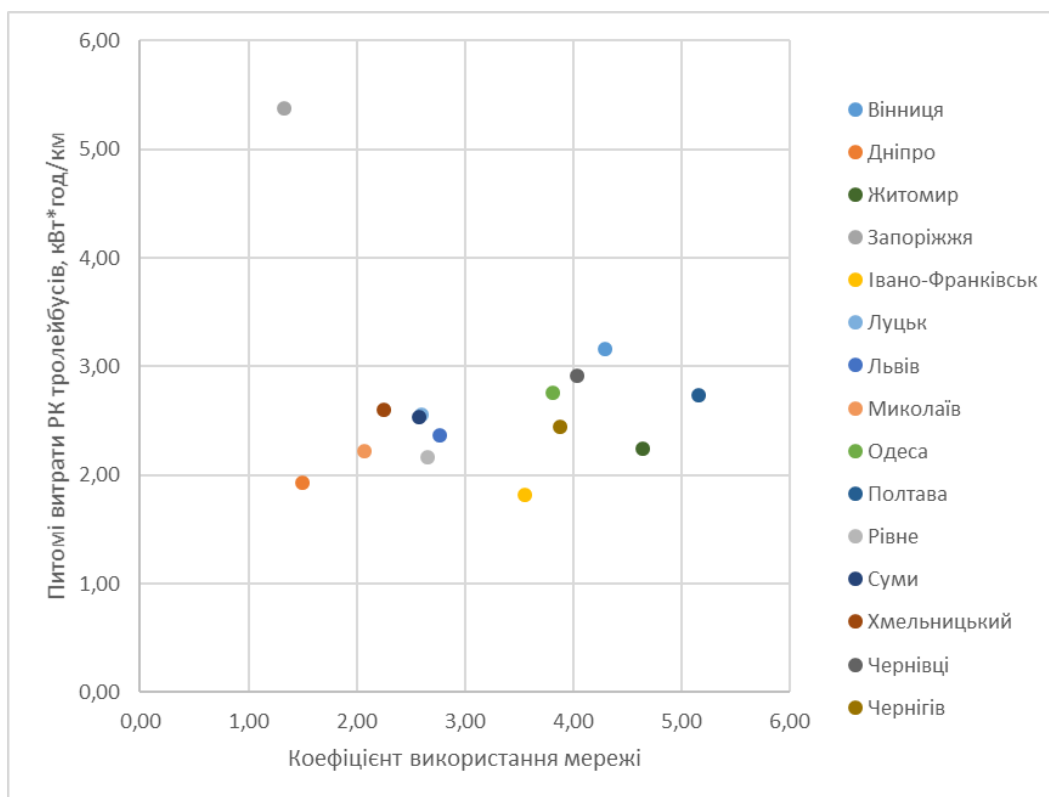


Рисунок 27. Графік розсіювання питомих витрат на тягу тролейбусів з реостатними системами керування в залежності від коефіцієнту використання мережі.

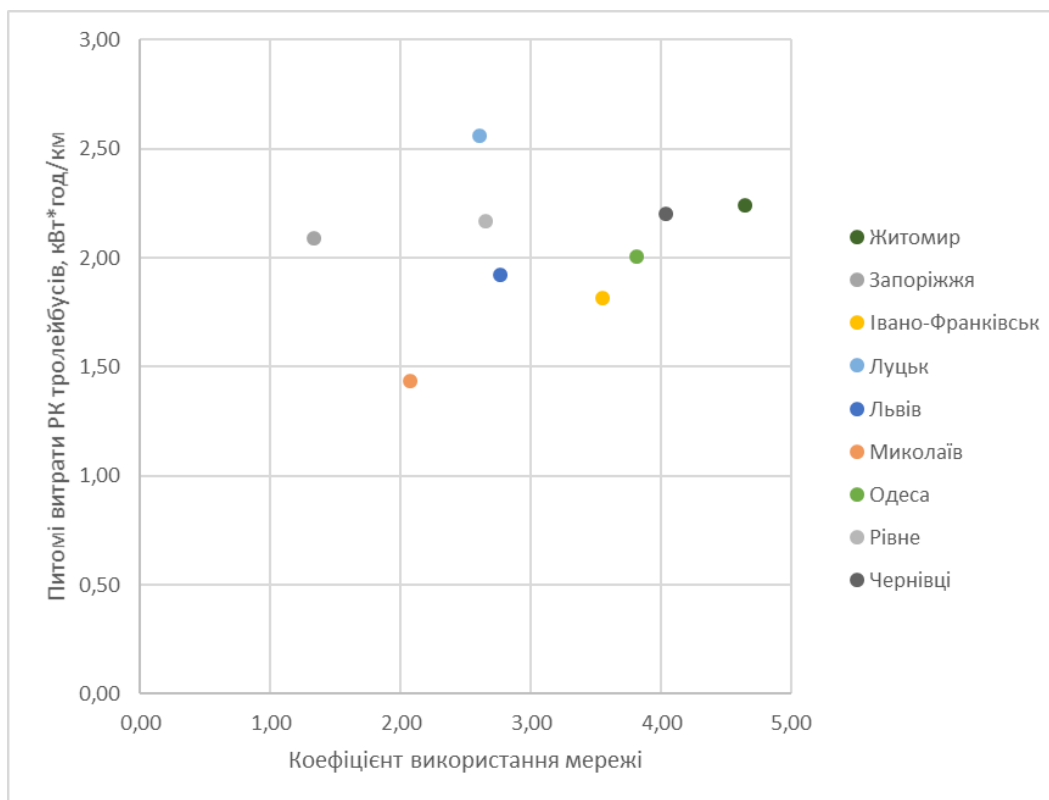


Рисунок 28. Графік розсіювання питомих витрат на тягу трамваїв з електронними системами керування з рекуперацією залежно від коефіцієнта використання мережі.

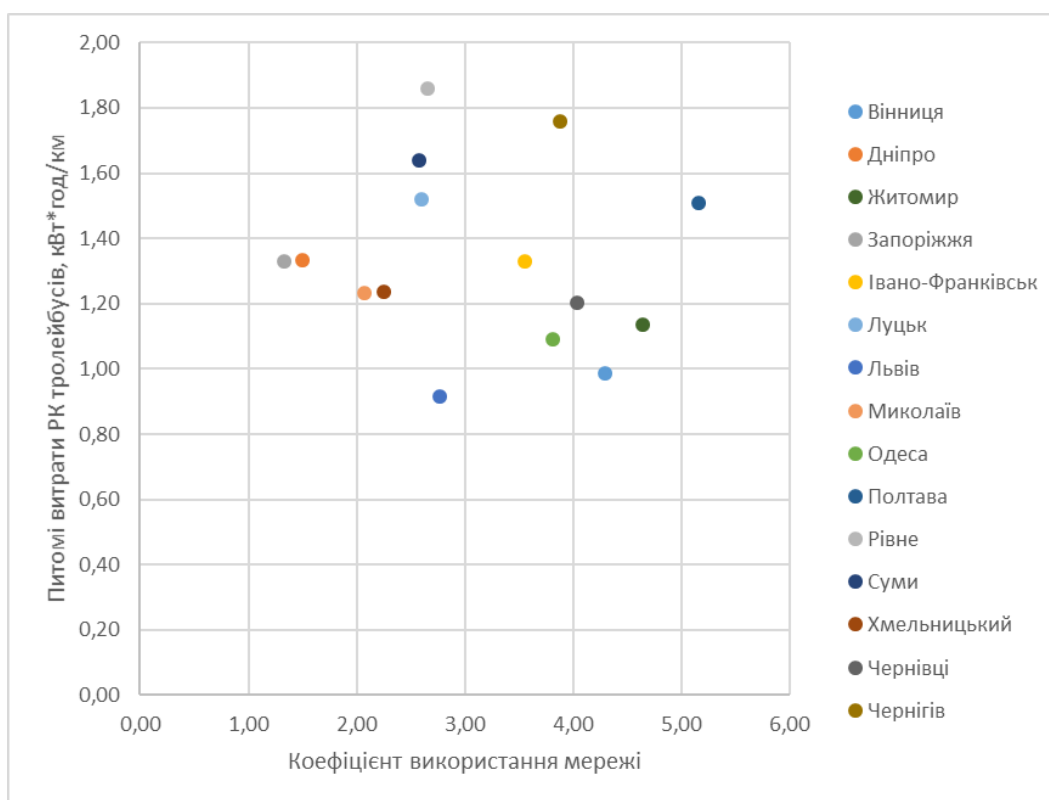


Рисунок 29. Графік розсіювання питомих витрат на тягу тролейбусів з електронними системами керування з рекуперацією залежно від коефіцієнта використання мережі.

Для аналізу залежності питомих витрат від завантаженості мережі розраховано середні витрати на тягу за видами транспорту в кожному досліджуваному місті. Ці дані нанесено на мапи розсіювання (рис. 30-31) та побудовано лінії тренду, що відображають загальний характер впливу обсягів руху на витрати електроенергії.

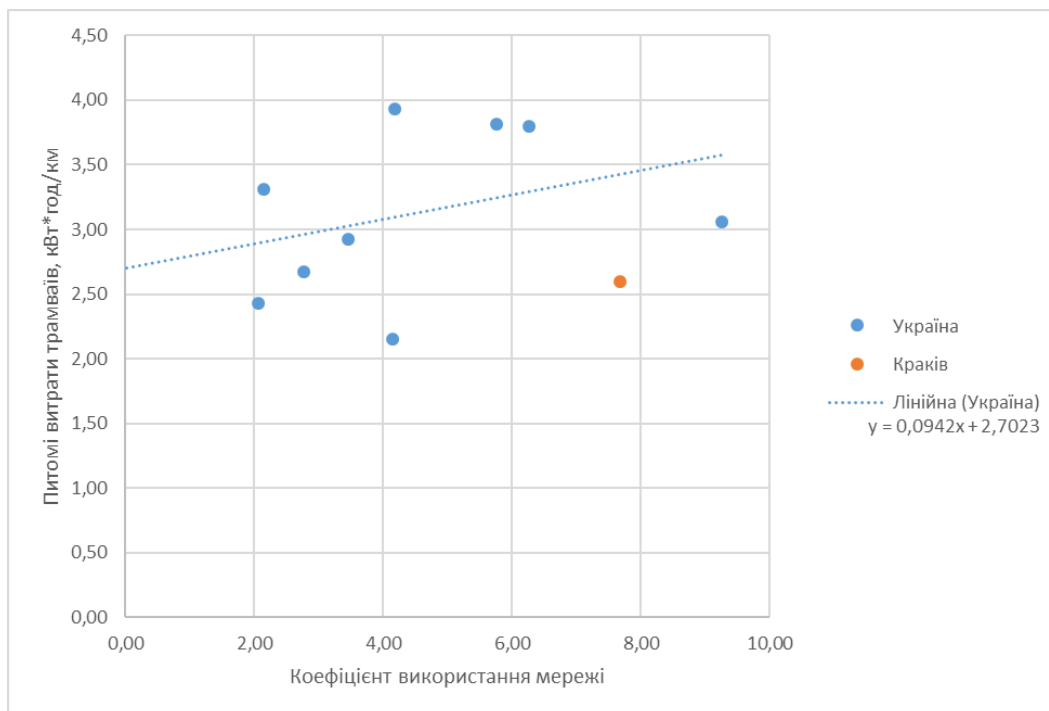


Рисунок 30. Графік розсіювання питомих витрат на тягу трамваїв залежно від коефіцієнта використання мережі з лінійним трендом.

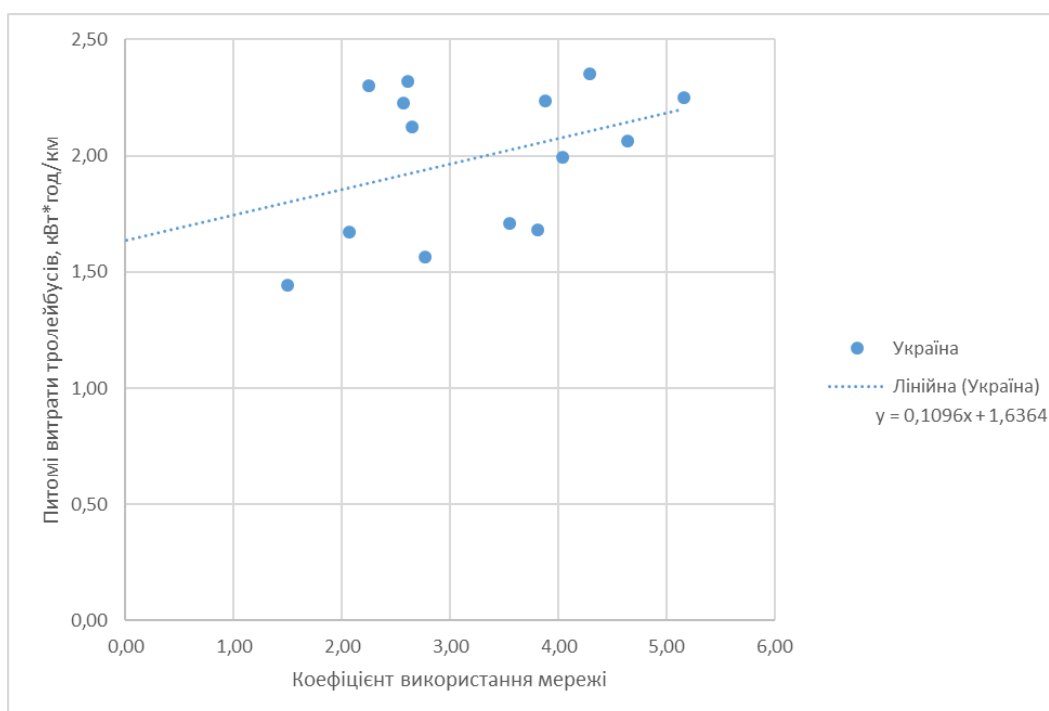


Рисунок 31. Графік розсіювання питомих витрат на тягу тролейбусів залежно від коефіцієнта використання мережі з лінійним трендом.

Із сукупності питомих витрат на рис. 27 Запоріжжя суттєво вирізняється, про що також зазначено в додатку для цього міста. Тому його нетипові показники по тролейбусах виключені на рис. 31.

Попри не надто велику кількість міст у вибірці, лінії тренду на рис. 30-31 показують зростання питомих витрат на тягу зі збільшенням завантаженості мережі як для трамваїв, так і для тролейбусів. Це зростання є природним і пов'язане зі збільшенням втрат у контактній та кабельній мережі в міру зростання навантаження.

Як відомо, втрати у провідниках прямо пропорційні опору цих провідників та квадрату струму, що по них протікає. Тобто, зі збільшенням коефіцієнта використання мережі та зростанням середніх

значень струмів у тяговій мережі, питомі витрати на тягу — які вимірюються на тягових підстанціях і включають як безпосередньо витрати рухомим складом на рух, так і втрати в мережі — збільшуються.

Для міст, що мають трамваї середньозважене значення питомих витрат складає 3,22 кВт·год/км. Якщо умовно продовжити лінію тренду до осі ординат (рис. 30), що відповідає нульовому коефіцієнту використання мережі і, відповідно, нульовим втратам, то питомі витрати для цієї точки складуть близько 2,70 кВт·год/км, а коефіцієнт корисної дії тягової мережі складе $2,70 / 3,22 = 0,838$. Тобто близько 16,2% складають втрати в тяговій мережі від місць обліку (лічильники на приєднаннях трансформаторів перетворювальних агрегатів до РУ 6-10 кВ) до рухомого складу.

Для міст, що мають тролейбуси середньозважене значення питомих витрат складає 2,04 кВт·год/км, а значення, що відповідає нульовому об'єму руху і нульовим втратам 1,64 кВт·год/км. Коефіцієнт корисної дії тягової мережі для цього випадку складає 0,820, а втрати в тяговій мережі, відповідно, 18,0%.

Для мереж електротранспорту, які збудовані у радянські часи, згідно з [7] ККД підстанцій, кабельних та контактних мереж в середньому складають 0,95, 0,95 та 0,85 відповідно, що разом дорівнює $ККД\ 0,95\ 0,95 \cdot 0,85 = 0,77$, що співставно з ККД 0,838 та 0,82 розрахованого для трамваїв та тролейбусів досліджуваних міст.

Середній ККД тягових мереж для всіх типів рухомого складу для досліджуваних міст складає 82,9%.

При цьому в українських містах майже не застосовуються підсилюючі лінії (рис. 32), які зменшують опір і, відповідно, втрати в контактній мережі. Поодинокі випадки (рис. 33) їх застосування пов'язані не зі зменшенням втрат, а з великим навантаженням на довгі ділянки. Без підсилення такі ділянки не забезпечують термічної стійкості контактної мережі, нормальних рівнів напруги та/або відключення віддалених коротких замикань.



Рисунок 32. На фото з Вінниці [4] бачимо стандартну для України трамвайну лінію. На найновішій ділянці видно лише підключення контактних проводів до шафи живлення, додаткові підсилюючі проводи відсутні.



Рисунок 33. Нечастий випадок застосування підсилюючої лінії в Україні. На фото з Києва [4], окрім контактних дротів двох напрямів на нижній поперечині, на верхній підвішено третій, підсилюючий дріт, який з'єднано з контактними еквіпотенціальною перемичкою.

Використання підсилюючих ліній лише в особливо критичних випадках, замість більш широкого та економічно обґрунтованого застосування, призводить до збільшення втрат у контактній мережі при середній і високій інтенсивності руху, а також при використанні енергоємного рухомого складу. Це особливо актуально для трамваїв.

Проміжний висновок: зменшення втрат у тяговій мережі є другим за важливістю фактором, який може підвищити енергоефективність роботи підприємств міського електротранспорту.

Порівняння витрат на технологічні потреби

Аналіз витрат на технологічні потреби по кожному місту окремо показав, що вони не корелюють з обсягами руху ані за наявності, ані за відсутності електроопалення. Локально по містах за 10-річний період дослідження спостерігалось як зростання, так і падіння цих витрат, що детально описано в розділі, присвяченому конкретним містам. У цьому ж розділі виконано порівняння витрат на технологічні потреби між містами України.

В середньому по досліджуваних містах за 2014-2023 роки частка витрат на технологічні потреби складає:

$$W_{\text{сер.техн.}} / (W_{\text{сер.техн.}} + W_{\text{сер.тяг.}}) = 31\,989\,427 / (31\,989\,427 + 202\,873\,998) = 13,6 \%$$

де $W_{\text{сер.техн.}}$ – середні витрати на технологічні потреби розраховані за даними табл. 8;

$W_{\text{сер.тяг.}}$ – середні витрати на тягу розраховані за даними табл. 3

Примітка: Конотоп не був включений до аналізу витрат на технологічні потреби через те, що підприємство надало лише сукупні витрати електроенергії, які в дослідженні враховано як 100% на тягу.

Таблиця 8 містить середні значення за період дослідження, а дані технологічних витрат охоплюють, зокрема, витрати на електроопалення (за його наявності).

Таблиця 8. Витрати електроенергії на технологічні потреби

Місто	Технологічні витрати	Кількість депо	Витрати на одне депо	Пробіг РС	Витрати на 1 км пробігу
Депо без електроопалення					
Краків (Польща)	10894415,0	5	2178883,0	14981103,1	0,7272
Вінниця	2471741,4	2	1235870,7	9790740,0	0,2525
Запоріжжя	3562045,6	2	1781022,8	5197610,0	0,6853
Кам'янське	1273100,0	1	1273100,0	1488077,6	0,8555
Одеса	4833950,0	3	1611316,7	12553275,3	0,3851
Рівне	357921,3	1	357921,3	2806353,0	0,1275
Хмельницький	1341036,4	1	1341036,4	3923069,0	0,3418
Депо з електроопаленням					
Дніпро	7375369,4	5	1475073,9	14696790,0	0,5018
Житомир	1653850,0	2	826925,0	4425940,0	0,3737
Івано-Франківськ	747557,3	1	747557,3	1798043,9	0,4158
Луцьк	629259,2	1	629259,2	2479116,5	0,2538
Львів	2551231,9	3	850410,6	6558470,3	0,3890
Миколаїв	1923941,3	2	961970,7	3840722,0	0,5009
Полтава	646910,0	1	646910,0	3234676,9	0,2000
Суми	791024,1	1	791024,1	2238319,0	0,3534
Чернівці	1258340,7	2	629170,4	2784247,1	0,4520
Чернігів	930070,0	1	930070,0	3620000,0	0,2569

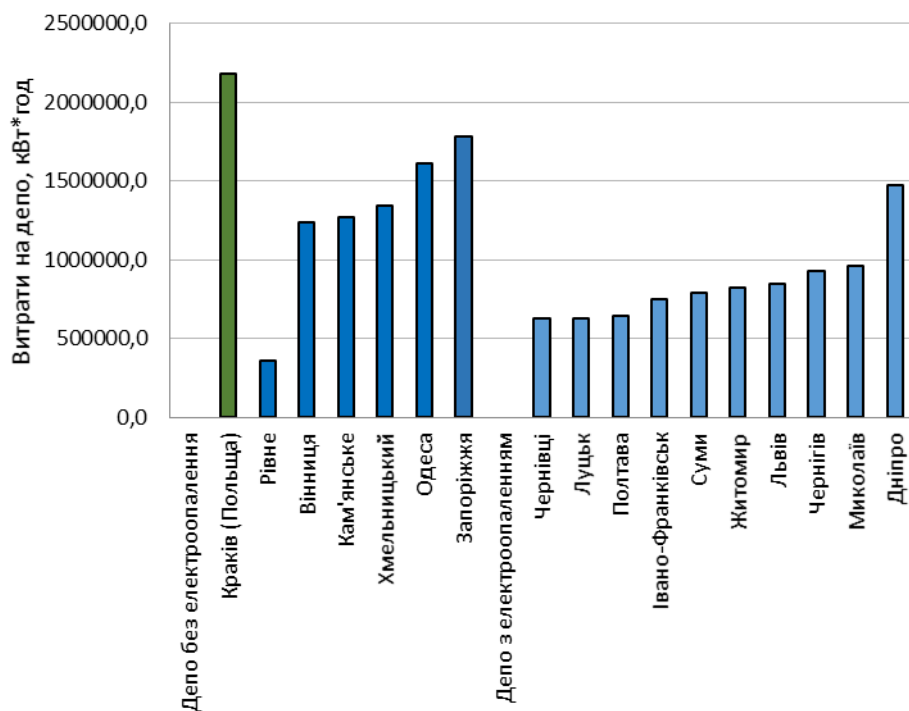


Рисунок 34. Рейтинг міст за витратами електроенергії на технологічні потреби в перерахунку на 1 депо.

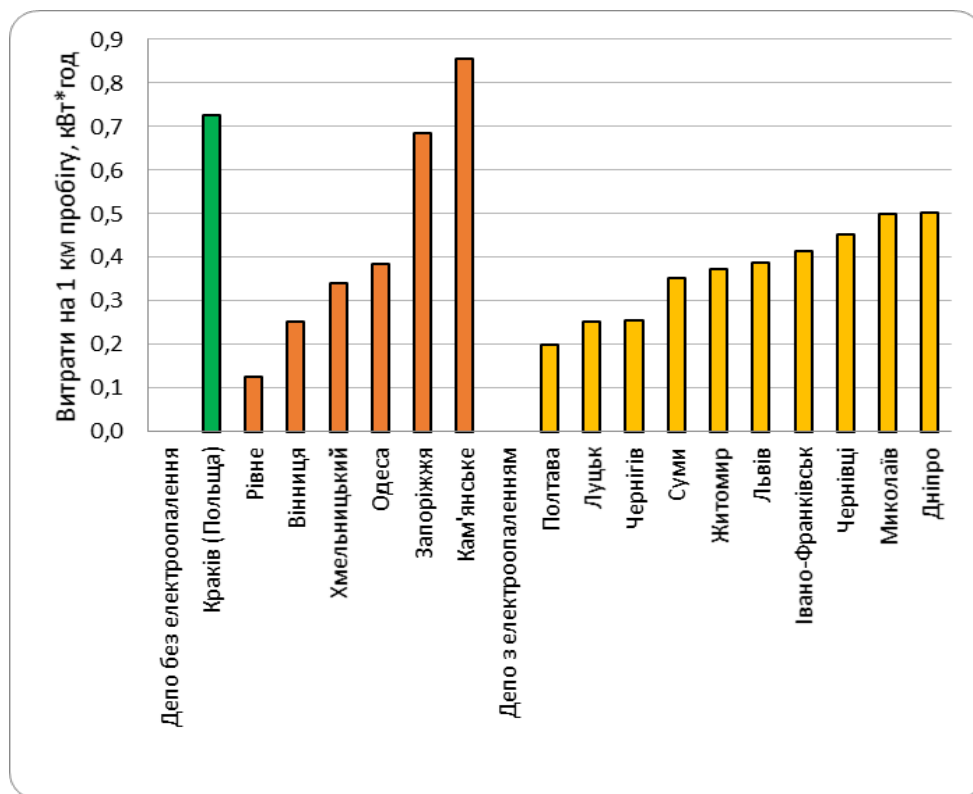


Рисунок 35. Рейтинг міст за витратами електроенергії на технологічні потреби в перерахунку на 1 км транспортної роботи.

Як видно на рис. 34-35, витрати електроенергії на технологічні потреби суттєво коливаються як у перерахунку на 1 депо, так і на 1 км транспортної роботи. Більше того, підприємства, що мають депо без електроопалення, в середньому споживають більше, ніж ті, що з ним. Зважаючи на відсутність кореляції з обсягами транспортної роботи в кожному місті окремо, можна однозначно стверджувати, що величина витрат на технологічні потреби має виключно локальні причини, які склалися історично. Це може бути пов'язано з надмірними розмірами чи кількістю адміністративних будівель, цехів, диспетчерських або ж з великими втратами тепла при електроопаленні та неефективними технологічними процесами.

Вісім українських підприємств (у порядку зменшення витрат: Кам'янське, Запоріжжя, Дніпро, Миколаїв, Чернівці, Івано-Франківськ) мають показники технологічних витрат вищі за середній на 1 км транспортної роботи, який становить 0,3966 кВт·год. При цьому їхнє власне середнє значення складає 0,5686 кВт·год, що в 1,94 раза більше, ніж 0,2934 у «нижньої» половини.

Аналогічний підрахунок на 1 депо виявляє інший список з 9 підприємств (у порядку зменшення витрат: Запоріжжя, Одеса, Дніпро, Хмельницький, Кам'янське, Вінниця, Миколаїв, Чернігів, Львів) з витратами у 1,93 раза вищими, ніж у «нижньої» половини.

На рис. 35-36 також представлені дані Кракова. У порівнянні з ним технологічні витрати українських підприємств не є надто високими. Однак об'єктивне порівняння з Краковом неможливе, оскільки і технологічні витрати, і кількість депо включають дуже розвинену автобусну інфраструктуру.

Проміжний висновок: міста, які увійшли в обидва списки (Запоріжжя, Кам'янське, Дніпро, Миколаїв), мають першочергово провести енергоаудит нетягових споживачів, оскільки вони мають найбільший потенціал для підвищення їхньої енергоефективності.

Інші 7 міст, що увійшли лише в один список (Чернівці, Івано-Франківськ, Одеса, Хмельницький, Вінниця, Чернігів, Львів), мають середню енергоефективність технологічних споживачів. Відповідно, вони також мають потенціал для зменшення витрат.

Дані про витрати на технологічні потреби свідчать про значний потенціал підвищення енергоефективності підприємств міського електротранспорту, особливо для міст з малими обсягами руху, де цей напрямок займає конкурентну позицію з підвищенням ефективності тягової мережі.

Міста, що не увійшли у списки (Житомир, Суми, Полтава, Луцьк, Рівне), можна назвати відносно ефективними з точки зору витрат електроенергії на технологічні потреби порівняно з іншими українськими містами, які потрапили у дослідження.

Власні джерела електроенергії українських підприємств МЕТ

Власні джерела електроенергії серед підприємств міського електротранспорту України не поширені.

Єдине місто, що має власне джерело, фотопанелі, – Вінниця, яка встановила їх наприкінці 2023 року.

Фотопанелі потужністю 100 кВт за 2,5 місяці роботи згенерували 7228 кВт-год. Коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП) за цей період, що припав на осінь-зиму, склав 3,96%.

Примітка: середній річний КВВП за повний рік в Україні складає орієнтовно 14%.

Відповідно до фактичних даних роботи ФЕС у 2020-2021 роках представлених у [8] (рис. 36), середній КВВП для половини жовтня, повного листопада та грудня склав:

$$\text{КВВП}_{2,5\text{міс}} = (10,99/2 + 5,08 + 2,14 + 13,4/2 + 6,92 + 1,85) / 5 = 4,7\%.$$

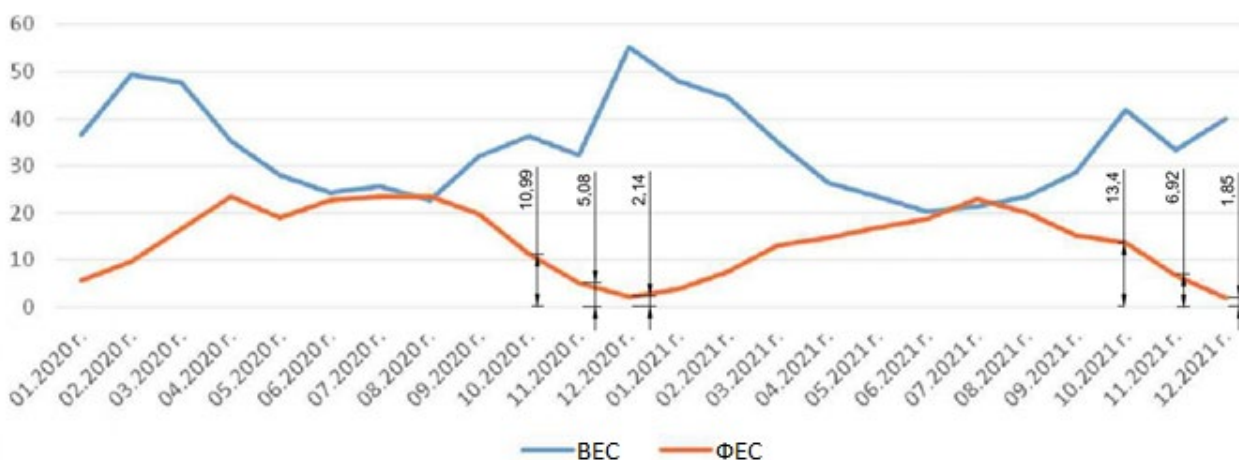


Рисунок 36. КВВП ФЕС (СЕС) та ВЕС в Україні по місяцях у 2020-2021 роках

Фотопанелі підприємства міського електротранспорту (МЕТ) у Вінниці відпрацювали перші 2,5 місяці з коефіцієнтом використання встановленої потужності (КВВП) трохи нижчим за середньоукраїнський, але близьким до нього. Відхилення в цьому випадку є цілком нормальним,

адже генерація фотопанелей дуже залежить від місцевих умов, а середньоукраїнський показник включає значну кількість сонячних електростанцій (СЕС) у південних регіонах з вищим рівнем сонячного випромінювання.

Примітка: для оцінки були прийняті дані за 2020-2021 роки. Це пов'язано з тим, що інформація про генерацію електроенергії з 2022 року вважається чутливою для енергосистеми і не публікується.

Можливості підвищення енергоефективності

Оновлення рухомого складу

Оновлення рухомого складу є основним і найбільш впливовим способом зменшення витрат електроенергії в роботі підприємств МЕТ. Як вже було сказано у розділі аналізу, витрати на технологічні потреби серед досліджених підприємств в цілому складають лише 13,6%, тобто 86,4% - витрати електроенергії на тягу.

Відповідно до даних табл. 3, 4 та проведених вище розрахунків об'єми руху зменшилися на 8,5%, а витрати електроенергії на тягу зменшилися на 27,2%. Якщо виключити ефект від зменшення об'ємів руху, то чисте зменшення витрат на тягу склало:

$$\frac{225\,253\,819 \times 0,915 - 164\,007\,371}{225\,253\,819 \times 0,915} = 20,4\%$$

Щоб оцінити ефект від оновлення рухомого складу, розрахуємо орієнтовні значення витрат електроенергії на перспективу. При цьому припустимо, що обсяги руху збережуться на рівні 2023 року для наступних сценаріїв оновлення (табл. 9):

- **«Заміна РК (1)»:** всі трамваї з реостатними системами замінюються на трамваї з електронними системами без рекуперації. Всі тролейбуси з реостатними системами замінюються на тролейбуси з електронними системами та рекуперацією. Наявний рухомий склад з електронними системами без рекуперації зберігається на поточному рівні.
- **«Заміна РК (2)»:** весь рухомий склад з реостатними системами замінюється на рухомий склад з електронними системами та рекуперацією. Наявний рухомий склад з електронними системами без рекуперації зберігається на поточному рівні.
- **«Заміна РК, ЕС»:** весь рухомий склад з реостатними та електронними системами без рекуперації замінюється на рухомий склад з електронними системами та рекуперацією.

Для цієї оцінки використаємо середні значення питомих витрат за типами рухомого складу, розраховані в табл. 7. Припустимо, що майже весь парк досліджуваних міст складається з рухомого складу, який у середньому відповідає умовним одиницям, визначеним на початку цього дослідження.

Таблиця 9. Оцінка ефекту від оновлення рухомого складу у досліджуваних містах України.

Параметр	2014	Зміна, %	2023	Зміна, %	Заміна РК (1)	Зміна, %	Заміна РК (2)	Зміна, %	Заміна РК, ЕС
Витрати ЕЕ на тягу фактичні, кВтг	225 253 819	-27,19	164 007 371						
Витрати ЕЕ на тягу розраховані, кВтг	222 041 815	-26,45	163 320 366	-20,93	129 130 668	-24,77	122 865 837	-31,25	112 275 712
Похибка розрахунку, %	1,43		0,42						
Сумарний річний пробіг трамваїв, ваг-км	31 567 418	-18,71	25 659 905		25 659 905		25 659 905		25 659 905
Пробіг трамваїв РК, ваг-км	22 257 816	-46,24	11 965 619	-100,00	0	-100,00	0	-100,00	0
Пробіг трамваїв ЕС, ваг-км	7 211 663	29,22	9 318 597	128,41	21 284 216	0,00	9 318 597	-100,00	0
Пробіг трамваїв ЕР, ваг-км	2 097 938	108,57	4 375 689	0,00	4 375 689	273,46	16 341 308	486,42	25 659 905
Частка трамваїв РК, %	70,51		46,63		0,00		0,00		0,00
Частка трамваїв ЕС, %	22,85		36,32		82,95		36,32		0,00
Частка трамваїв ЕР, %	6,65		17,05		17,05		63,68		100,00
Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш-км	49 077 285	-1,89	48 147 794		48 147 794		48 147 794		48 147 794
Пробіг тролейбусів РК, маш-км	36 100 798	-59,41	14 653 676	-100,00	0	-100,00	0	-100,00	0
Пробіг тролейбусів ЕС, маш-км	7 319 163	3,51	7 576 050	1,56	7 694 401	1,56	7 694 401	-100,00	0
Пробіг тролейбусів ЕР, маш-км	5 657 324	358,13	25 918 067	56,54	40 571 744	56,54	40 571 744	85,77	48 147 794
Частка тролейбусів РК, %	73,56		30,43		0,00		0,00		0,00
Частка тролейбусів ЕС, %	14,91		15,73		15,98		15,98		0,00
Частка тролейбусів ЕР, %	11,53		53,83		84,27		84,27		100,00
Ціна* е.е., грн/кВтг	0,29633		8,71784		8,71784		8,71784		8,71784
Вартість е.е.,грн.	66 750 215		1 429 790 019		1 125 740 505		1 071 124 709		978 801 696

Як видно у таблиці 9, припущення щодо використання питомих показників витрат на тягу для умовних одиниць є виправданим. Похибка розрахунку порівняно з фактичними значеннями складає 1,4% для 2014 року та 0,3% для 2023 року відповідно.

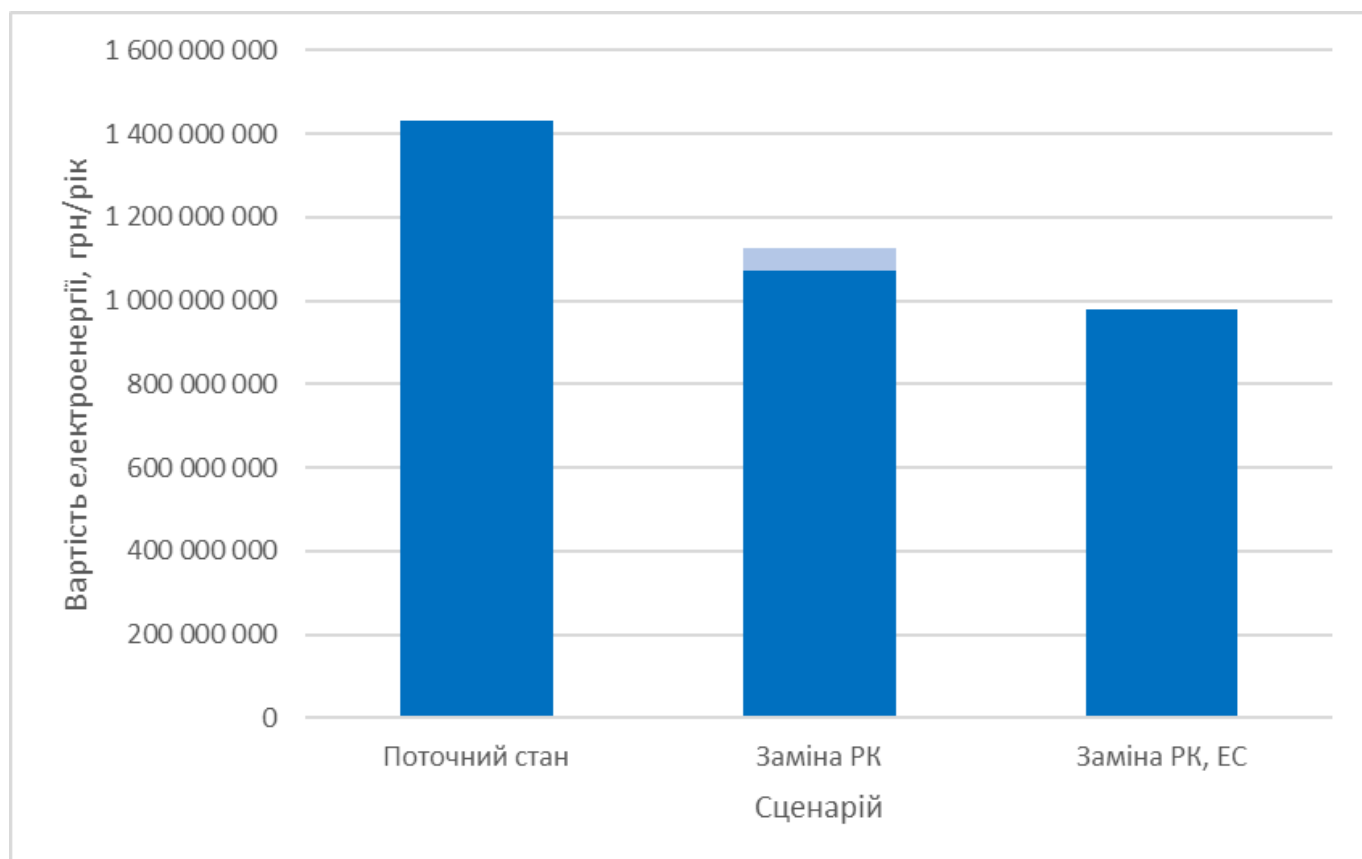


Рисунок 37. Сумарна орієнтовна вартість електроенергії на тягу для досліджуваних підприємств України в поточних цінах: Столпчик 1: поточна структура парку рухомого складу. Столпчик 2 (блакитний): сценарій «Заміна РК (1)». Столпчик 2 (синій): сценарій «Заміна РК (2)». Столпчик 3: сценарій «Заміна РК, ЕС». Сценарій «Заміна РК (1)» зменшує витрати на тягу на 20,9% (рис. 37). Сценарій «Заміна РК (2)» зменшує витрати на тягу на 24,8%. Сценарій «Заміна РК, ЕС» зменшує витрати на тягу на 31,3% відносно поточного стану.

Таблиця 9 включає не всі міста України, а лише ті, що надали дані для дослідження. Для повнішої оцінки перспектив оновлення рухомого складу по всій країні (за винятком міст, що були окуповані та/або зруйновані станом на 2023 рік) ми проведемо розрахунок на перспективу. Це буде зроблено аналогічно до попереднього, але з урахуванням пробігу та структури парку по всіх містах України (за винятком окупованих) на основі даних [1] за 2023 рік (табл. 10).

Сценарій «Заміна РК (1)» по Україні призводить до зменшення витрат на тягу на 17,9%. У поточних цінах на електроенергію (станом на 01.12.2024 згідно з [9]) орієнтовний економічний ефект від заміни складе 420 млн грн/рік (рис. 38). Виконання цього сценарію передбачає заміну всіх трамваїв з реостатними системами на електронні без рекуперації шляхом придбання вживаних вагонів, заміну всіх тролейбусів з реостатними системами на електронні з рекуперацією шляхом придбання нових або вживаних, та збереження трамваїв і тролейбусів з електронними системами без рекуперації.

Серед українських міст значний досвід в оновленні рухомого складу шляхом передбаченим у сценарії «Заміна РК (1)» мають Дніпро, Львів, які суттєво оновили парк трамваїв вживаними вагонами та парк тролейбусів новими машинами.

Сценарій «Заміна РК (2)» по Україні призводить до зменшення витрат на тягу на 23,1%. У поточних цінах на електроенергію орієнтовний економічний ефект від заміни становитиме 542 млн грн/рік.

Виконання цього сценарію передбачає:

- Заміну всіх трамваїв з реостатними системами на електронні з рекуперацією шляхом придбання нових вагонів, модернізації наявних та/або придбання вживаних.
- Заміну всіх тролейбусів з реостатними системами на електронні з рекуперацією шляхом придбання нових та/або вживаних.
- Збереження наявних трамваїв і тролейбусів з електронними системами без рекуперації.

Параметр	2023	Зміна, %	Заміна РК (1)	Зміна, %	Заміна РК (2)	Зміна, %	Заміна РК, ЕС
Витрати ЕЕ на тягу розраховані, кВтг	269 410 901	-17,88	221 250 343	-23,08	207 228 850	-33,77	178 430 362
Сумарний річний пробіг трамваїв, ваг-км	42 593 628		42 593 628		42 593 628		42 593 628
Пробіг трамваїв РК, ваг-км	29 170 713	-100,00	0	-100,00	0	-100,00	0
Пробіг трамваїв ЕС, ваг-км	9 124 073	319,71	38 294 786	-11,05	8 115 565	-100,00	0
Пробіг трамваїв ЕР, ваг-км	4 298 842	0,00	4 298 842	678,57	33 469 555	890,82	42 593 628
Частка трамваїв РК, %	68,49		0,00		0,00		0,00
Частка трамваїв ЕС, %	21,42		89,91		19,05		0,00
Частка трамваїв ЕР, %	10,09		10,09		78,58		100,00
Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш-км	73 797 773		73 797 773		73 797 773		73 797 773
Пробіг тролейбусів РК, маш-км	20 877 343	-100,00	0	-100,00	0	-100,00	0
Пробіг тролейбусів ЕС, маш-км	10 646 406	196,10	31 523 750	87,56	19 968 620	-100,00	0
Пробіг тролейбусів ЕР, маш-км	42 274 023	0,00	42 274 023	49,39	63 151 367	74,57	73 797 773
Частка тролейбусів РК, %	28,29		0,00		0,00		0,00
Частка тролейбусів ЕС, %	14,43		42,72		27,06		0,00
Частка тролейбусів ЕР, %	57,28		57,28		85,57		100,00
Ціна* е.е., грн/кВтг	8,72		8,72		8,72		8,72
Вартість е.е.,грн.	2 348 681 133		1 928 825 092		1 806 587 956		1 555 527 343

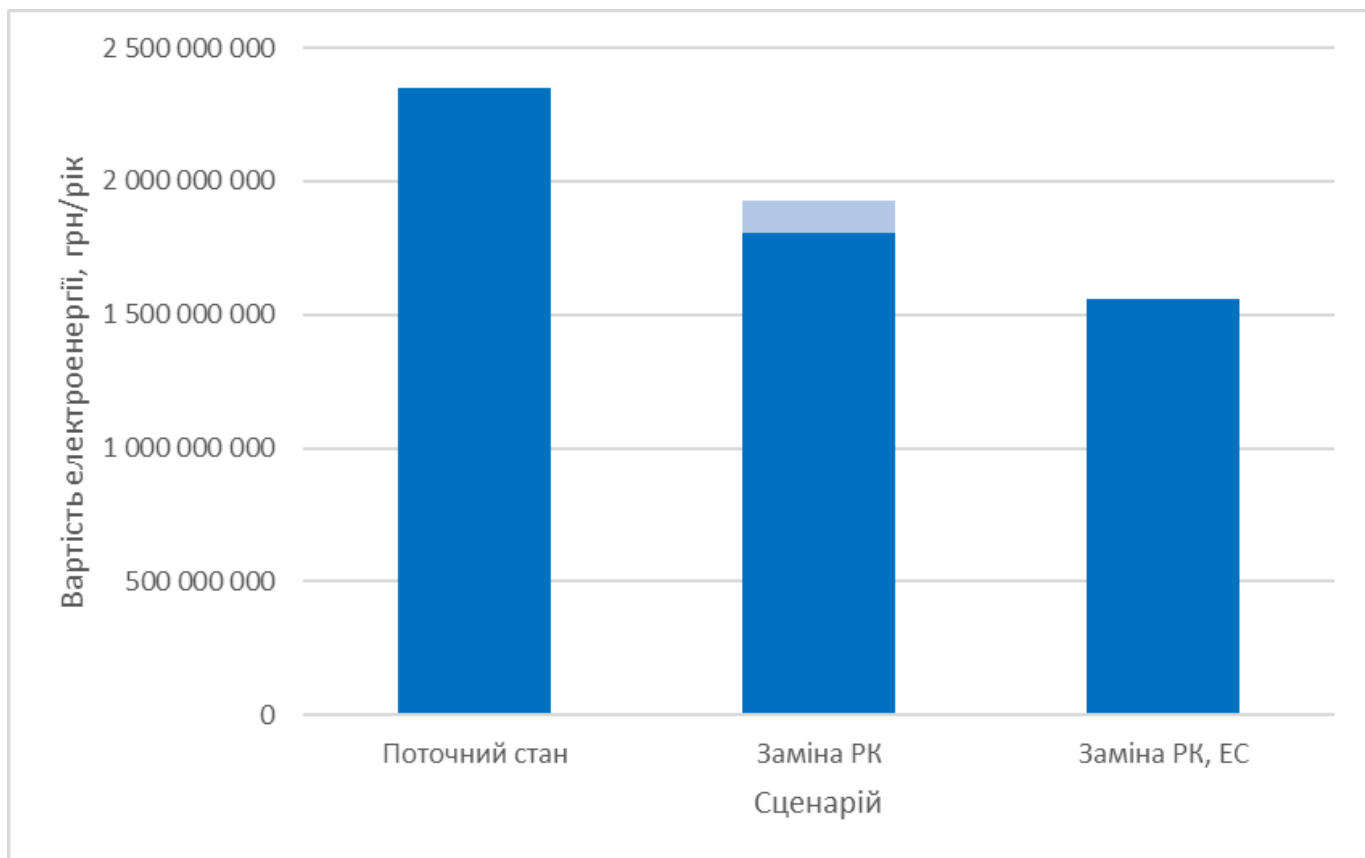


Рисунок 38. Сумарна орієнтовна вартість електроенергії на тягу для всіх підприємств України в поточних цінах: поточна структура парку рухомого складу (стовпчик 1). Сценарій «Заміна РК (1)» (стовпчик 2, блакитний). Сценарій «Заміна РК (2)» (стовпчик 2, синій). Сценарій «Заміна РК, ЕС» (стовпчик 3).

Більшість українських міст активно оновлюють парк тролейбусів, замінюючи їх на сучасний та економічний рухомий склад. Проте оновлення трамвайного парку відбувається значно повільніше.

Найбільших успіхів серед українських міст у цьому напрямку досягла Одеса, яка активно модернізує трамваї, встановлюючи електронні системи керування з рекуперацією [10]. Завдяки цьому місто має найвищий відсоток оновлення рухомого складу та найнижчий показник питомих витрат електроенергії серед міст із трамваєм (рис. 51). Цей досвід може бути корисним для всіх міст.

Вартість комплексу для модернізації трамвайного вагона, що включає як систему керування, так і допоміжне електрообладнання, становить 4,4 млн грн [10]. За поточних цін на електроенергію та середніх розрахункових витрат для реостатно-контактних (РК) та електронних з рекуперацією (ЕР) систем, така заміна окуповується при пробігу модернізованого вагона у 298 тис. км, або приблизно за 5,33 роки. У цьому розрахунку не враховано вартість виконання робіт із заміни електрообладнання. Однак, хоча модернізація й потребує робочого часу персоналу, нова електронна система надалі під час експлуатації вимагає менше часу на обслуговування.

Сценарій «Заміна РК, ЕС» по Україні призводить до зменшення витрат на тягу на 33,8%. За поточними цінами на електроенергію орієнтовний економічний ефект від такої заміни становитиме 793 млн грн/рік. Цей сценарій передбачає заміну всього рухомого складу з реостатними та електронними системами без рекуперації на новий, вживаний або модернізований транспорт з електронними системами керування з рекуперацією.

Потреба в рухомому складі для досліджуваних міст та всіх міст України для виконання сценаріїв оновлення наведена в таблиці 11. Міста, які не потрапили до дослідження, мають нижчу

ефективність використання рухомого складу (річний пробіг одиниці), яку можна підвищити, що, своєю чергою, зменшить потребу в кількості трамвайних вагонів та тролейбусів.

Таблиця 11.
Потреба в рухомому складі для оновлення.

Міста	Рухомий склад	Сценарій	
		Заміна РК	Заміна РК, ЕС
Досліджувані міста України	Трамваї	443	788
	Тролейбуси	441	669
Вся Україна*	Трамваї	1330	1746
	Тролейбуси	804	1214
Вся Україна* з підвищенням ефективності**	Трамваї	965	1381
	Тролейбуси	181	591
* Всі міста України, що не були окуповані та/або зруйновані до 2023 року включно			
** Підвищення ефективності використання РС у відстаючих містах до рівня досліджуваних			

Потреба в оновленні рухомого складу для кожного окремого міста має оцінюватися індивідуально, враховуючи реальні потреби та режими роботи, а не лише наявний рухомий склад на балансі. Це дозволить підвищити ефективність використання транспорту.

Якщо для всіх міст України прийняти середній річний пробіг на рівні досліджуваних (33,3 тис. км/рік для тролейбусів та 27,0 тис. км/рік для трамваїв), то за умови збереження поточного рівня транспортної роботи потреба для повного оновлення трамваїв та тролейбусів в Україні становитиме 1381 (умовний 15-метровий) трамвайний вагон та 591 (умовний одинарний) тролейбус.

Висновок: Для суттєвого зменшення (понад 30%) споживання електроенергії на тягу, що є основною складовою споживання підприємств МЕТ України, необхідне оновлення мінімум 1,38 тис. трамваїв та 0,59 тис. тролейбусів за умови збереження обсягів руху на рівні 2023 року.

Оновлення може відбуватися як шляхом закупівлі нового або вживаного рухомого складу з більш енергоефективними системами керування, так і шляхом модернізації наявного. Враховуючи, що вартість трамваїв є досить високою, а частка системи керування у вартості значно нижча, ніж у тролейбусів, а також довший термін служби трамваїв, не варто відкидати модернізацію із заміною систем керування та, за потреби, пристосування вагонів до інших сучасних вимог. Щодо тролейбусів ситуація протилежна: більшість із тих, що мають енергоємні системи керування, є фізично та морально застарілими, а вартість їхньої модернізації, через високу частку систем керування у ціні, матиме дуже низький ефект.

Модернізація системи електропостачання

Тягові мережі

Модернізація тягових мереж є основним напрямом зменшення втрат у контактній та кабельній мережах, а також ефективнішого використання енергії рекуперації.

Зменшення втрат досягається шляхом зменшення електричного опору через збільшення сумарного перерізу провідників.

Для кабельних мереж, втрати в яких становлять близько чверті загальних втрат у тяговій мережі [7], можливе:

- використання кабелів з більшим перерізом;

- прокладання по коротшій трасі, якщо дозволяють місцеві умови;
- прокладання здвоєних кабельних ліній (кожен окремий кабель зменшеного перерізу, але з більшим сумарним). Це, окрім зменшення опору та втрат у нормальному режимі роботи, дозволяє також зберігати нормальну схему секціонування у випадку виходу з ладу одного з кабелів, замість переприєднання секцій контактної мережі до суміжних зі значно більшими втратами та гіршими умовами по напрузі, робочим струмом та струмом короткого замикання.

Для контактних мереж, втрати в яких найбільші [7], можливе:

- використання контактного проводу більшого перерізу;
- будівництво підсилюючих ліній (окремих або як частини конструктиву при поздовжньо-ланцюговій підвісці).

Влаштування підсилюючих ліній, особливо для трамвайних мереж, є найбільш простим та ефективним заходом. Наприклад, щоб зменшити втрати на ділянці вдвічі, необхідно змонтувати підсилюючу лінію з опором, еквівалентним контактній мережі. При цьому її розміщення можливе на тих самих поперечинах, що й контактних проводів, як ми бачили на рис. 18-19, що майже не потребує додаткових елементів, окрім ізоляторів та затискачів.

За високої інтенсивності руху в цілому мережею, як бачимо, в Дніпрі та Львові (рис. 5-8), втрати в тяговій мережі орієнтовно становлять до 30-35%, з яких 20-25% припадає на втрати в контактній мережі. Така ж ситуація може спостерігатися і в інших містах з меншою середньою інтенсивністю руху, але високою на окремих ділянках, де сходиться багато маршрутів. Відповідно, зменшення втрат у контактній мережі вдвічі забезпечить економію електроенергії на 10-12%.

Для контактної мережі двоколіїної лінії, збудованої проводом МФ-85 (МФ-100) (найбільш поширений в Україні), підсилюючі лінії з еквівалентним опором можуть будуватися дротом 2 x М-95, 2 x А-150, 1 x А-300.

Примітка: наведено лише один приклад підсилюючої лінії для зменшення опору приблизно вдвічі. Проте для кожної лінії, залежно від інтенсивності руху, необхідно проводити індивідуальні тягові розрахунки, оцінювати можливі варіанти підсилення та їхній економічний ефект. Це важливо, оскільки нарощування перерізу тягової мережі кожні два рази збільшує вартість також у два рази, але ефект зменшення втрат від зменшення опору, навпаки, на кожне таке збільшення зменшується на величину вдвічі меншу.

Додатковими заходами для зменшення втрат у контактній мережі може бути зміна секціонування тягової мережі наступними способами:

- перенесення розрізів для нормального режиму з метою вирівнювання навантаження фідерів та зменшення середньої густини струму по ділянках;
- облаштування ділянок з двостороннім живленням від двох підстанцій.

Перенесення розрізів нормального режиму може виконуватися шляхом переміщення секційних ізоляторів. Іноді, за наявності значної кількості нормально замкнених секційних ізоляторів, можливе їх розмикання із замиканням суміжних.

Для розрахунку оптимального місця розташування розрізів на контактній мережі необхідно проводити індивідуальні тягові розрахунки або моделювання (погодинне чи для характерних годин) з нормальним розміщенням рухомого складу по мережі. Змінюючи місця розрізів, потрібно розраховувати втрати та обирати оптимальне місце, де значення втрат є найменшим. Такі

розрахунки доцільно проводити після суттєвої зміни мережі маршрутів або зміни випуску на існуючі маршрути, що призводять до непропорційної зміни інтенсивності руху по ділянках. У разі суттєвого впливу на рівень втрат у мережі слід виконувати перенесення секційних ізоляторів.

Влаштування ділянок з двостороннім живленням для завантажених ділянок забезпечує природне розтікання тягових струмів на два фідери, що зменшує втрати в мережі. Крім того, це дозволяє збільшити довжину ділянок, що знижує втрати енергії рекуперації. Це відбувається, по-перше, за рахунок збільшення кількості споживачів на тій же ділянці, по-друге, за рахунок електричного зв'язку шин постійного струму суміжних підстанцій у режимах малих навантажень, коли енергія рекуперації, що не може бути спожита в зоні однієї підстанції, перетікає до іншої, де такі споживачі є.

Влаштування ділянок з двостороннім живленням зараз на наземному електротранспорті зустрічається нечасто, тоді як на залізниці та в метрополітені — це типова схема. За старої елементної бази релейного захисту облаштування та обслуговування систем двостороннього живлення було складним і високовартісним. З розвитком технологій мікропроцесорного захисту, які використовуються на нових та модернізованих тягових підстанціях міського електротранспорту, організація двостороннього живлення стала значно простішою та дешевшою і потребує мінімум додаткового обладнання та мереж.

Висновок: для зменшення втрат в існуючій тяговій мережі необхідно виконати техніко-економічні розрахунки влаштування підсилюючих ліній та, за результатом, облаштовувати їх. Також слід виконувати такі розрахунки під час будівництва нових тролейбусних та, особливо, трамвайних ліній. Додатково, при змінах інтенсивності руху по мережі, необхідно виконувати розрахунки оптимального з точки зору втрат розташування секційних ізоляторів і, за потреби, здійснювати їх перенесення.

Системи накопичення енергії на підстанціях

Встановлення систем накопичення на тягових підстанціях, як показано на рис. 12, дозволяє максимізувати використання енергії рекуперації. Результати експерименту на рис. 17 свідчать, що це особливо актуально для режимів малих навантажень, наприклад, у вечірні години або для підстанцій, які живлять лінії з низькою інтенсивністю руху.

В якості накопичувачів на підстанціях потенційно можуть використовуватися акумулятори або суперконденсатори. Вони підключаються до шин постійного струму через захисний автомат. При цьому автомат виконуватиме лише функцію захисту від коротких замикань на стороні накопичувача, а обмеження струму підживлення короткого замикання на лінії накопичувачем здійснюватиме DC/DC-перетворювач самого накопичувача.

Середню ємність накопичувача слід обирати на рівні 2-4 циклів гальмування типового рухомого складу, що працює в зоні підстанції, де планується встановлення накопичувача. Вибір меншої ємності може призвести до значних втрат енергії, якщо одночасно або послідовно гальмуватимуть більше однієї одиниці рухомого складу. Завищення ж ємності недоцільне, оскільки навіть при одночасному або послідовному гальмуванні 2-3 одиниць все одно настане цикл розгону, і енергія буде використана. Для типового рухомого складу українських міст з чотиривісними трамвайними вагонами та/або одинарними тролейбусами робоча ємність може становити 1,5-3,0 кВт·год.

Потужність, яку накопичувач здатен приймати та видавати, варто обирати на рівні потужності гальмування/розгону 1-2 одиниць типового рухомого складу, що для більшості міст складає 150-300 кВт. Потужність накопичувача обмежується робочим струмом DC/DC-перетворювача та зарядним/розрядним струмом власне накопичувальних елементів.

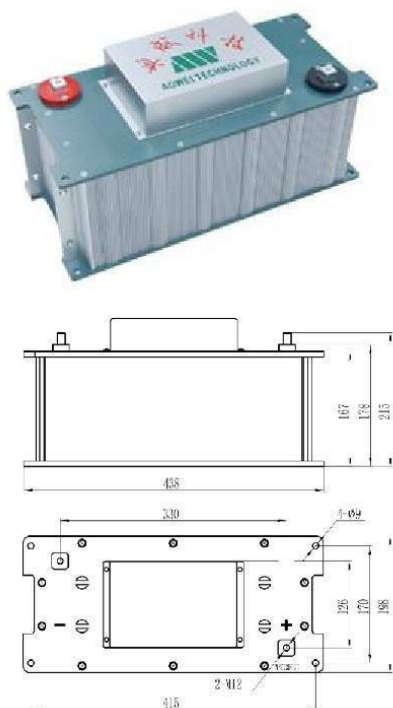
Ця остання особливість робить акумуляторні батареї майже непридатними для використання. Щоб забезпечити необхідний зарядний/розрядний струм для розрахованої потужності, їхня ємність буде завищена більш ніж у 100 разів від потрібної. Це технічно можливо за наявності достатнього місця для встановлення, але економічно недоцільно порівняно із суперконденсаторами. Суперконденсатори мають на два порядки вищі струми заряду/розряду, ніж акумулятори, що дає змогу реалізувати накопичувач з розрахованими параметрами. Тому вони є фактично єдиним оптимальним рішенням.

Наразі в Україні відсутній будь-який досвід використання накопичувачів на підстанціях. Проте вже є успішний досвід використання суперконденсаторних накопичувачів Aoweі на рухомому складі у місті Дніпро [11] (рис. 39).



Рисунок 39. Суперконденсаторний накопичувач Aoweі S585V36-K7, що використовується в тролейбусах з автономним живленням в Україні.

Для тягових підстанцій можна використовувати менш ємні накопичувачі. Наприклад, формувати необхідну ємність з **модулів** (рис. 40), або ж замовляти розробку індивідуальних систем з використанням елементів європейських, китайських, американських чи японських виробників.



Parameter Name	MUCK24V1910
Nominal Capacitance(F)	166
Nominal Voltage(V)	48
Surge Voltage(V)	51
AC Resistance(mΩ)	4.5
DC Resistance(mΩ)	5.0
Rated Stored Energy(Wh)	54
Maximum Continuous Current($\Delta T=150^{\circ}\text{C}$) (A)	77
Maximum Continuous Current($\Delta T=40^{\circ}\text{C}$) (A)	130
Maximum Pulse Current($\leq 1\text{s}$)(A)	1900
Cycle Life(cycles)	100万 (24 ~ 48V)
Weight (kg)	13.5
Operating Temperature($^{\circ}\text{C}$)	-40 ~ +65
Storage Temperature($^{\circ}\text{C}$)	-40 ~ +70
Allowed Maximum Torque of Terminal(N·m)	≤ 12

Рисунок 40. Модульний суперконденсаторний накопичувач Aowei MUCK24V1910, який можна використовувати для створення накопичувачів на тягових підстанціях.

Режим роботи накопичувача на тяговій підстанції відрізняється від накопичувача на рухомому складі. Базовим станом підстанційного накопичувача є розряджений, щоб він завжди був готовий прийняти енергію рекуперації. Після накопичення енергії він має підтримувати підвищену напругу на шинах і одразу віддавати її в контактну мережу, щойно з'явиться споживання.

Висновок: на тягових підстанціях в Україні доцільно встановлювати суперконденсаторні накопичувачі ємністю 1,5-3,0 кВт·год та робочою потужністю 150-300 кВт. Встановлювати їх слід насамперед на найменш завантажених підстанціях, за умови, що в їх зоні працює рухомий склад з можливістю рекуперативного гальмування.

Встановлення власних джерел енергії та зменшення технологічних витрат

Основним видом діяльності підприємств міського електротранспорту (МЕТ) є транспортна робота, яку виконує електричний рухомий склад, що є головним споживачем електроенергії. Також підприємства споживають електроенергію для супутніх технологічних потреб, таких як ремонтні зони, побутові та адміністративні приміщення. Виробництво електроенергії та самозабезпечення вже давно не є основним видом діяльності, на відміну від початку будівництва перших трамвайних систем з власними паровими та дизельними електростанціями.

Зважаючи на це, оптимальним варіантом власних джерел енергії, з точки зору простоти будівництва та обслуговування, є сонячні панелі. Їх можна розміщувати на дахах цехів депо та адміністративних будівель.

Розгляньмо Вінницю як приклад. Станом на кінець 2023 року там вже було встановлено панелі потужністю 100 кВт.

Загальна площа дахів будівель трамвайного (рис. 41) та тролейбусного депо, придатних для розміщення панелей (тобто тих, що не затіняються спорудами чи деревами і є плоскими або

мають південний скат), складає приблизно 8,7 тис. м². Цього достатньо для встановлення панелей загальною потужністю близько 1700 кВт. З коефіцієнтом використання, аналогічним вже встановленим панелям, вони вироблятимуть 1 818 тис. кВт·год енергії за рік. Це становить 77% від споживання підприємства на технологічні потреби у 2023 році.

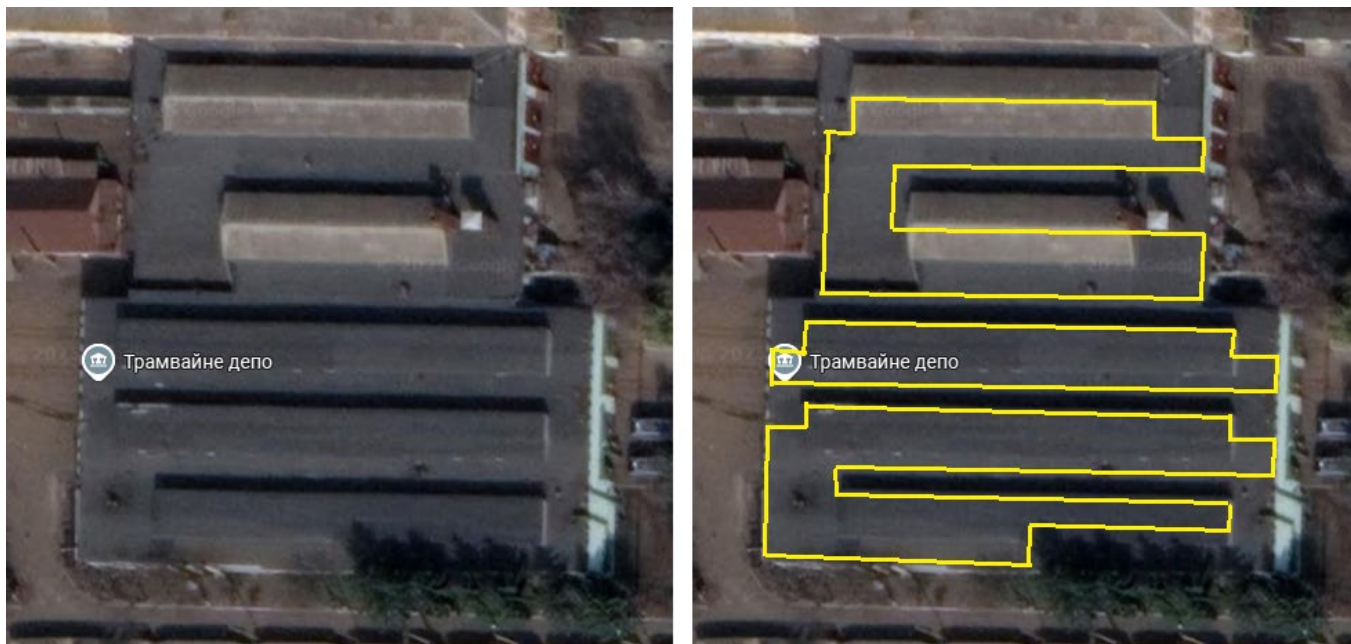


Рисунок 41. Трамвайне депо у Вінниці з супутника [4] (зліва) з позначенням місць на даху, де можливе встановлення сонячних панелей (справа).

Висновок: рівень виробництва електроенергії дахових СЕС (сонячних електростанцій) на будівлях підприємств МЕТ, зважаючи на некерований графік їхньої роботи протягом доби та року, не зможе повністю забезпечити технологічні потреби в автономному режимі. Однак, інвестувавши у панелі, підприємства як активні споживачі зменшуватимуть витрати на закупівлю електроенергії.

Підсумок

Наразі підприємства міського електротранспорту України перебувають у перехідному стані – між пострадянським занепадом і розвитком, що, своєю чергою, впливає на їхні енергетичні показники.

Основним споживачем електроенергії є рухомий склад. Підвищення його енергоефективності відбувається помірними темпами. Більш активними в цьому напрямку є тролейбусні депо, що пов'язано з меншою вартістю рухомого складу. Подальше оновлення можливе, насамперед, шляхом придбання нових трамваїв і тролейбусів, а також, як важливий проміжний етап, через модернізацію наявних трамваїв. Повне оновлення рухомого складу орієнтовно призведе до зменшення споживання електроенергії на тягу понад 30%.

Друге та третє місце поділяють технологічні витрати та втрати у тяговій мережі та підстанціях.

Тягові мережі та підстанції залишаються найбільш відстаючою ланкою підприємств електротранспорту. При цьому під час ремонтів, реконструкцій та будівництва нових трамвайних і тролейбусних ліній недостатньо уваги приділяється їхній енергоефективності. Роботи виконуються виключно з розрахунку технічних потреб, без урахування економічних аспектів.

Наразі втрати в тяговій мережі в досліджених містах у середньому становлять 18% від витрат на тягу і мають потенціал до зменшення шляхом:

- влаштування підсилюючих ліній;
- зміни перерізу кабелів та контактних проводів;
- заміни трансформаторів та перетворювальних агрегатів.

Крім того, для повнішого використання енергії рекуперації, у міру оновлення рухомого складу, варто розглядати встановлення суперконденсаторних накопичувачів на тягових підстанціях.

Технологічні витрати електроенергії становлять у середньому 10-15% від усього споживання електроенергії підприємствами МЕТ. Найбільші показники спостерігаються в містах, де депо не мають електроопалення, що свідчить про дуже низьку ефективність і, відповідно, значний потенціал до зменшення. У більшості ж міст витрати на власні потреби не є надто високими і переважно стабільні або демонструють незначне зменшення. Основним напрямком подальшого зменшення цих витрат є будівництво дахових сонячних станцій, які частково покриватимуть технологічні витрати.

Джерела

1. <https://www.korpmet.org.ua/> - Корпорація «Укрелектротранс». Аналітична інформація
2. <http://kstat.pp.ua/> - Статистика транспорту.
3. <https://alltransua.com/database> - Alltransua. Все про громадський транспорт.
4. <https://www.google.com.ua/maps/>
5. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/11/NOW_Projektcheck_publish_BOB-Solingen.pdf
6. Mikołaj Bartłomiejczyk, Slobodan Mircevski. Reducing of energy consumption in public transport – Results of experimental exploitation of super capacitor energy bank in Gdynia trolleybus system: 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, Turkey, 2014.
7. Загайнов Н. А., Финкельштейн Б. С. Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса: Транспорт, 1978.
8. <https://e-b.com.ua/izmencivoe-solnce-i-poputnyi-veter-3299>
9. <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric/prom/market/2024-12/>
10. <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2024-07-13-000384-a>
11. <http://www.aowei.com/en/program/productinfo-105.html>
12. https://www.static.tu.berlin/fileadmin/www/10002264/ews/2023-sose/20230703_EWS_Folien_BVG_Umstellung_Strassenbahnspeisung_auf_750_V_Berliner_Tram-Netz.pdf

Додатки

Додаток А. Вінниця

На кривих пробігу та витрат електроенергії Вінниці (рис. А.1) за досліджуваний період спостерігається незначне падіння обсягів руху як трамваїв, так і тролейбусів. При цьому витрати електроенергії на тягу зменшуються швидше, що пояснюється закупівлею тролейбусів з більш економічною системою керування та модернізацією трамваїв. У 2020 році помітне зниження споживання на тягу пов'язане з обмеженнями під час пандемії COVID-19 і, як наслідок, зменшенням завантаженості рухомого складу та витрат енергії на його рух.

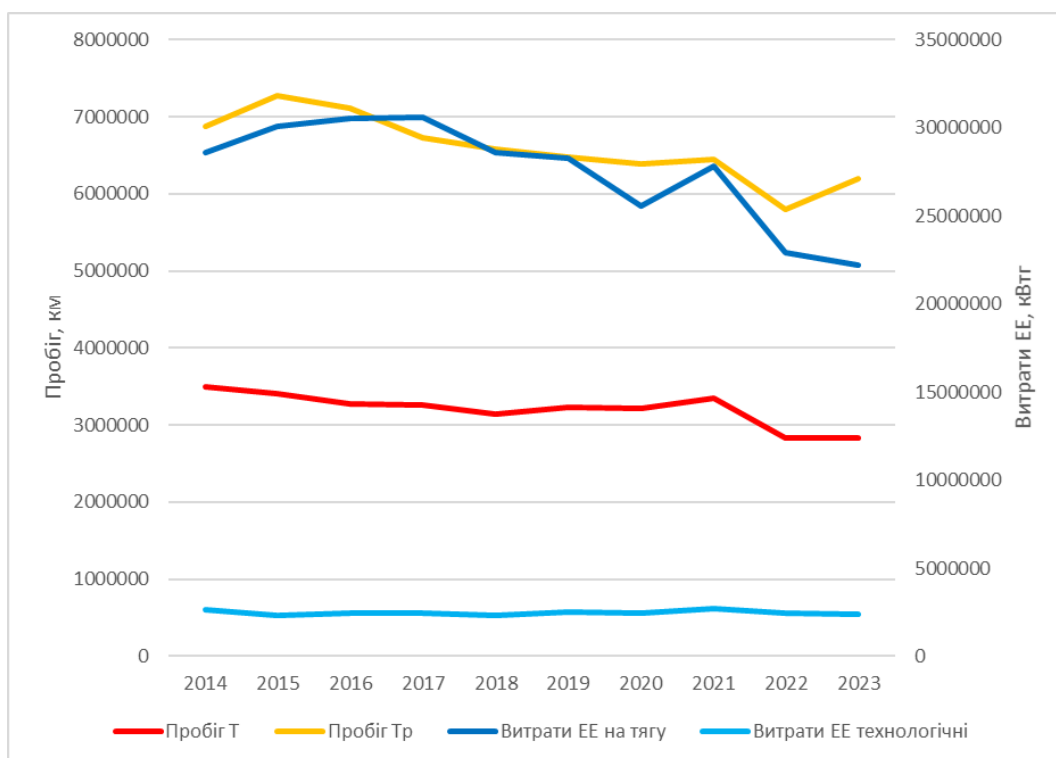


Рисунок А.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Вінниця.

Розрахункові значення питомих витрат на 1 км пробігу умовних трамваїв та тролейбусів:

- трамваї з реостатними системами керування – 3,07 кВт·год/км;
- трамваї з електронними системами керування без рекуперації – 3,01 кВт·год/км;
- трамваї з електронними системами керування та рекуперацією – 2,95 кВт·год/км;
- тролейбуси з реостатними системами керування – 3,17 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 0,99 кВт·год/км.

Майже однакові значення розрахункових питомих витрат для трамваїв з різними системами керування не зовсім відповідають сутності таких систем.

Основу парку вагонів з реостатними системами керування у Вінниці складають швейцарські вагони Ве 4/4 та Ве 4/6. Щодо особливостей їхньої роботи було проведено консультацію з технічним директором КП «Вінницька транспортна компанія». Однак, згідно з наданими ним даними, жодних особливих режимів роботи системи керування цих вагонів не передбачають:

розгін виконується без перегрупування двигунів, а потім — послаблення поля, що є типовим для більшості вагонів з реостатними системами в Україні. Тому пошук причин однакових розрахункових значень звівся до похибки розрахунку.

Структура парку трамваїв за період спостереження не мала суттєвого зменшення частки трамваїв з реостатним керуванням. Це вносить додаткову похибку через гіршу збіжність ітераційного методу розрахунку, що зрештою могло призвести до майже однакових значень розрахункових питомих витрат для вагонів з різними системами керування. Проте середні питомі витрати для всіх вагонів у Вінниці є невисокими порівняно з іншими містами, при частці реостатних вагонів у 2014-2022 роках у 90-100%. Це свідчить про дійсно відносно низькі питомі витрати навіть для реостатних вагонів, через що, ймовірно, вони і в реальності наближаються до витрат вагонів з електронними системами керування.

Розрахункові питомі витрати для тролейбусів, навпаки, мають велику різницю. Втім, ці показники не є абсолютно відповідними реальним питомим витратам, які необхідно розраховувати на основі вимірів на кожній одиниці рухомого складу. Розрахункові питомі витрати по кожному типу РС показують вплив цього типу на загальні витрати підприємства на тягу, які включають і ефективність споживання рекуперованої енергії, і втрати в тяговій мережі, що залежать від обсягів руху. Вплив обсягів руху на втрати в мережі та, як наслідок, на загальне споживання буде проаналізовано далі для сукупності всіх міст України.

Витрати електроенергії підприємством на технологічні потреби за період спостереження зменшилися на 10,4%, що співставно зі змінами річного пробігу умовних трамваїв (-14,4%) та тролейбусів (-9,9%).

Таблиця А.1. Розрахунок показників міста Вінниця

Місто, назва підприємства: Вінниця, КП "Вінницька транспортна компанія"										
Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Загальні річні витрати на електроенергію підприємства, кВт·г, з них:	312 276 25	324 125 30	32 985 25 2	33 049 95 0	30 944 69 9	30 811 9 72	28 043 39 7	30 568 71 4	25 352 26 6	24 579 86 2
на тягу (виміряні на тягових підстанціях), кВт·г	265 98 25 0	300 68 43 7	305 38 45 0	30 59 79 50	26 61 77 00	26 291 73 0	25 577 5 14	2 76 50 38 0	2 28 95 46 2	2 22 23 20 0
частка, %	91, 5799 7	92, 7679 4	92, 5821 3	92, 5809 3	92, 4801 4	91, 820 58	91, 2069	91, 10881	90, 30926	90, 412 22 44 5
розрахункове значення	2998 299 7	306 66 95 4	29 74 58 5 0	26 8 22 9 14	26 03 44 55	27 940 40 3	27 10 63 32	2 68 64 28 2	2 37 04 19 1	2 19 47 11 3, 38
різниця / цільова функція	0, 0023 45	0, 0003 96	0, 0006 74	0, 0033 65	0, 0004 15	0, 0001 54	0, 0035 73	0, 0012 53	0, 0012 48	0, 0001 54 34 4
питомі витрати середні, кВт·г/км	2, 58 705 1	2, 64 87 22	2, 76 18 08	2, 86 29 88	2, 75 03 59	2, 71 47 46	2, 46 28 99	2, 64 57 26	2, 44 71 4	2, 27 35 90 75 7
на електроопалення депо, кВт·г	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Технологічні витрати	26 293 75	23 440 93	24 488 02	24 520 00	23 269 99	25 202 42	24 658 83	27 18 534	24 568 24	23 566 62
частка, %	8, 4200 29	7, 2320 58	7, 4178 67	7, 4190 73	7, 5198 63	8, 1794 25	8, 7930 97	8, 8931 91	9, 690 74	9, 5877 75 55 4
Власні джерела енергії:										
Тип (фотопанелі і т. ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 Фотопанелі
Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Річний генерація (кВт·г)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7228 (2,5 міс)
Кількість депо	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
...з них з електроопаленням	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Трамвайна мережа										
Сумарний річний пробіг трамваїв, ваг-км	3494300	3411500	3268700	3261100	3136800	3227700	3208500	3343800	2636700	2632400
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв, ваг-км	41 7498 3	40 7605 3	39 4491 2	39 662 17	38 276 76	39 388 03	39 153 73	40 80 481	35 5180 8	35 738 94, 346
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв РК, ваг-км	41 7498 3	40 4486 7	38 085 46	36 856 42	34 878 93	35 889 67	35 676 38	37 18 062	31 65 980	29 855 59, 40 7
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕС, ваг-км	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22 449 3, 925 9
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕР, ваг-км	0	31 185, 93	1 363 66, 1	280 574, 4	3 399 83, 4	34 983 5, 6	34 775 4, 6	36 24 19, 2	38 98 28, 3	36 384 1, 012 3
Довжина трамвайної мережі в однокільному обчисленні, км	44, 4	44, 4	44, 4	44, 4	44, 4	44, 4	44, 07	44, 07	44, 07	44, 07
Коефіцієнт використання трамвайної мережі (пробіг за годину)	8, 9840 7	8, 771 38 6	8, 3910 76	8, 3844 98	8, 0649 14	8, 3607 65	8, 2883 23	8, 6615 01	7, 3479 51	7, 3368 12 64 7
Коефіцієнт використання трамвайної мережі умовний	10, 7341 5	10, 479 79	10, 1426 2	10, 19 74	9, 8417 16	10, 202 75	10, 1420 5	10, 569 74	9, 200 307	9, 257 17 73 5
Кількість трамваїв за довжиною	132	132	128	127	128	128	128	128	102	108
13-14 м	30	30	30	29	30	30	30	30	20	20
з реостатною системою керування	30	30	30	25	25	25	25	25	15	15
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	4	5	5	5	5	5	5
18-19 м	37	37	32	31	30	30	30	30	17	17
з реостатною системою керування	37	36	31	30	29	29	29	29	16	16
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20 м	65	65	64	64	64	64	64	64	61	61
з реостатною системою керування	65	65	64	64	64	64	64	64	61	61
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21-22 м	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31 м	0	0	2	3	4	4	4	4	4	4
з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	2	3	4	4	4	4	4	4
Умовний вагонів (приведені до довжини 15 м)	157, 713 3	157, 713 3	154, 48	154, 46	156, 2	156, 2	156, 2	156, 2	127, 713 3	136, 273 33 33
з реостатною системою керування	157, 713 3	156, 506 7	149, 14	143, 533 3	142, 326 7	142, 326 7	142, 326 7	142, 326 7	113, 84	113, 84
частка, %	100	99, 234 9	96, 543 24	92, 925 89	91, 118 22	91, 118 22	91, 118 22	91, 118 22	89, 13 713	83, 537 98 73 8
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8, 56
частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6, 261 49 30 78
з електронною системою керування та рекуперацією	0	1, 206 66 7	5, 34	10, 926 67	13, 873 33	13, 873 33	13, 873 33	13, 873 33	13, 873 33	13, 873 33 33 33
частка, %	0	0, 765 101	3, 456 75 8	7, 074 10 8	8, 881 77 6	8, 881 77 6	8, 881 77 6	8, 881 77 6	10, 86 26 7	10, 180 51 95 4
Тролейбусна мережа										
Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш-км	68 7940 0	72 7600 0	711250 0	672120 0	657720 0	648270 0	638610 0	644600 0	580420 0	620060 0
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів, маш-км	68 7940 0	72 7600 0	711250 0	672120 0	657720 0	648270 0	638610 0	644600 0	580420 0	620060 0
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів РК, маш-км	477346 1	50 4965 3	489984 4	46208 25	45218 25	436590 0	405973 5	369010 1	3275 227	226299 2, 701
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕС, маш-км	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕР, маш-км	210593 9	222734 7	222265 6	21003 75	20553 75	21188 00	23263 65	275589 9	25289 73	39376 07, 29 9
Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км	172, 9	172, 9	172, 9	172, 9	172, 9	177, 8	177, 8	177, 8	177, 8	177, 8
Коефіцієнт використання тролейбусної мережі (пробіг за годину)	4, 5420 45	4, 8038 96	4, 6831 16	4, 4375 96	4, 3425 21	4, 1621 72	4, 0889 48	4, 138 609	3, 726 546	3, 9810 520 26
Коефіцієнт використання тролейбусної мережі умовний	4, 5420 45	4, 8038 96	4, 6959 47	4, 4375 96	4, 3425 21	4, 1621 72	4, 1001 51	4, 138 609	3, 726 546	3, 9810 520 26
Кількість тролейбусів за типом	147	147	144	144	144	147	140	138	140	137
Одинерні	147	147	144	144	144	147	140	138	140	137
з реостатною системою керування	102	102	99	99	99	99	89	79	79	50
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	45	45	45	45	45	48	51	59	61	87
Зленовані	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Умовний тролейбусів (приведені до одиниці)	147	147	144	144	144	147	140	138	140	137
з реостатною системою керування	102	102	99	99	99	99	89	79	79	50
частка, %	69, 3877 6	69, 3877 6	68, 75	68, 75	68, 75	67, 346 94	63, 571 43	57, 246 38	56, 428 57	36, 496 350 26
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	45	45	45	45	45	48	51	59	61	87
частка, %	30, 6122 4	30, 6122 4	31, 25	31, 25	31, 25	32, 653 06	36, 428 57	42, 75 362	43, 571 43	63, 503 649 64

Додаток Б. Дніпро

На кривих пробігу та витрат електроенергії Дніпра (рис. Б.1) спостерігається нерівномірність обсягів руху трамваїв по роках із тенденцією до падіння. Натомість обсяги руху тролейбуса зростали до повномасштабного вторгнення РФ.

Крива витрат електроенергії на тягу за профілем схожа на криву пробігу трамваїв. Це пояснюється домінуючою роллю цього виду транспорту в місті, адже пробіг трамвая за досліджуваний період був у 1,85 раза більшим, ніж у тролейбуса.

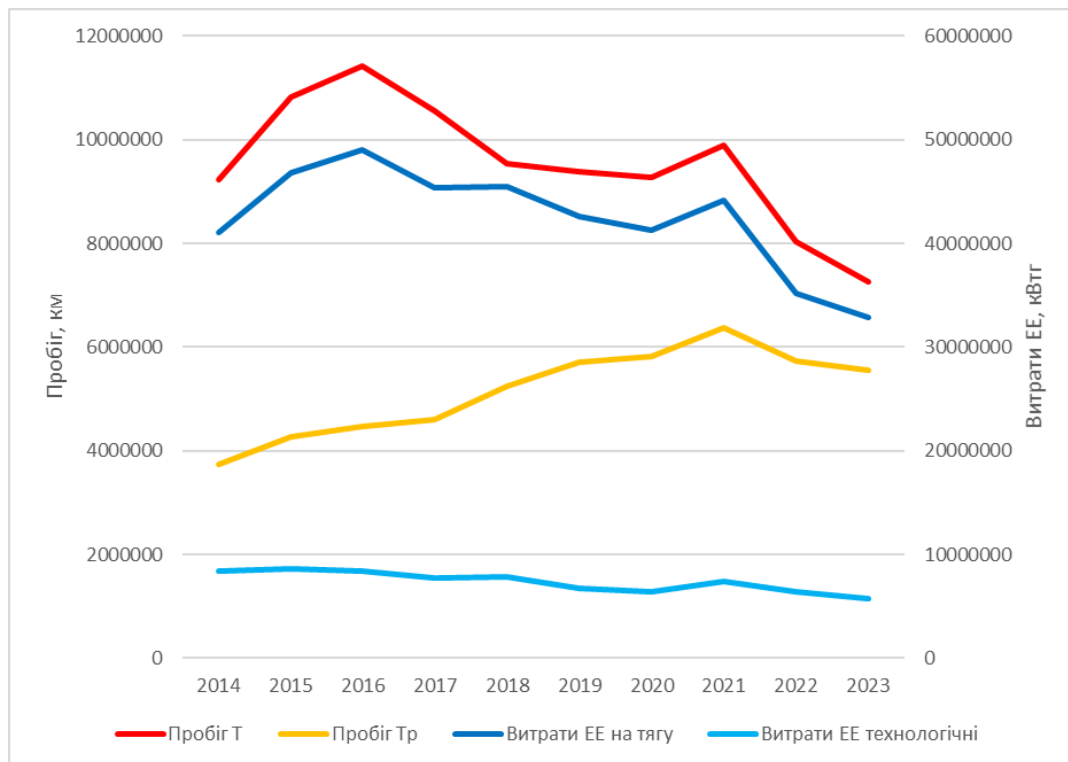


Рисунок Б.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Дніпро.

Розрахункові значення питомих витрат на 1 км пробігу умовних трамваїв та тролейбусів:

- трамваї з реостатними системами керування – 4,33 кВт·год/км;
- трамваї з електронними системами керування без рекуперації – 3,38 кВт·год/км;
- тролейбуси з реостатними системами керування – 1,93 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 1,33 кВт·год/км.

Витрати електроенергії підприємством на технологічні потреби, за період спостереження зменшилися на 31,0%, при тому, що зміни річного пробігу умовних трамваїв склали -23,5%, а тролейбусів +34,1%. Враховуючи, що всі 4 депо та 1 АТП у Дніпрі мають електроопалення, яке займає значну частку не тягових витрат і при цьому майже не залежить від кількості рухомого складу чи об'ємів транспортної роботи, а лише від розмірів приміщень та їх тепловтрат, можна відмітити, що за попередні 10 років підприємством вже проведена значна робота з підвищення енергоефективності нетягових споживачів.

Але, не дивлячись на зменшення яке відбулося за попередні 10 років, витрати електроенергії на технологічні потреби все одно залишаються помітно вищими за середні по Україні в перерахунку на одне депо, і вищими але співставними в перерахунку на 1 км транспортної роботи. Враховуючи відсутність кореляції витрат на технологічні потреби з об'ємами руху, підприємству слід звернути увагу на можливі заходи зі зменшення цих витрат або проведення енергоаудиту нетягових споживачів.

Таблиця Б.1. Розрахунок показників міста Дніпро

Місто, назва підприємства:		Дніпро, КП "Дніпровський електротранспорт"									
№	Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:	49408722	55354358	57491820	53113930	53304739	49401455	47673572	51580241	41601244	38649647
1а	натягу (виміряні натягових підстанціях), кВтг	41017002	46763605	49044674	45354698	45490005	42644990	41233623	44181521	35239212	32856703
	частка, %	83,01571	84,48044	85,30722	85,39134	85,33951	86,32335	86,49157	85,6559	84,70711	85,01165
	розрахункове значення	40728998	47229628	49639425	46455451	43131991	42220226	40937905	43427090	36183942	33338974
	різниця / цільова функція	4,93E-05	9,93E-05	0,000147	0,000589	0,002687	9,92E-05	5,14E-05	0,000292	0,000719	0,000215
	питомі витрати середні, кВтг/км	3,306994	3,249643	3,238622	3,142727	3,221326	2,970407	2,887374	2,876632	2,703382	2,699706
1б	на електроопалення депо, кВтг	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Технологічні витрати	8391720	8590752	8447146	7759232	7814734	6756465	6439949	7398720	6362032	5792944
	частка, %	16,98429	15,51956	14,69278	14,60866	14,66049	13,67665	13,50843	14,34411	15,29289	14,98835
3	Власні джерела енергії:										
3а	Тип (фотопанелі і т.ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3б	Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3в	Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Кількість депо	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4а	...з них з електроопаленням	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
5	Трамвайна мережа										
5а	Сумарний річний пробіг трамваїв, ваг-км	9239500	10819200	11416600	10555100	9546000	9373600	9276800	9896700	8038600	7267400
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв, ваг-км	8498445	9951445	10500930	9704715	8749834	8513703	8343742	8856637	7193809	6503555
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв РК, ваг-км	4584190	5485057	5787923	5380529	4452788	3806924	3185890	3051093	2478252	2240496
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕС, ваг-км	3814255	4466388	4713007	4374186	4287046	4706779	5157852	5805544	4715557	4263160
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕР, ваг-км	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5б	Довжина трамвайної мережі в однокільній обчисленні, км	172,061	172,247	172,142	171,962	171,962	171,962	172,143	172,226	172,226	172,214
	Коефіцієнт використання трамвайної мережі (пробіг за годину)	6,13002	7,170334	7,550185	7,006897	6,337016	6,223898	6,135027	6,559754	5,328164	4,817331
	Коефіцієнт використання трамвайної мережі умовний	5,638361	6,595236	6,963648	6,442378	5,80849	5,651736	5,530086	5,870378	4,768217	4,311069
6	Кількість трамваїв за довжиною	260	260	260	259	239	247	253	254	254	254
6а	14-15 м	212	212	212	212	192	200	207	208	208	208
	з реостатною системою керування	100	100	100	100	80	68	55	46	46	46
	з електронною системою керування без рекуперації	112	112	112	112	112	132	152	162	162	162
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6б	15-16 м	48	48	48	47	47	47	46	46	46	46
	з реостатною системою керування	36	36	36	35	35	35	34	34	34	34
	з електронною системою керування без рекуперації	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6в	Умовних вагонів (приєднаних до довжини 15 м)	239,1467	239,1467	239,1467	238,1333	219,0667	224,2933	227,5533	227,3067	227,3067	227,3067
	з реостатною системою керування	131,8133	131,8133	131,8133	130,8	111,7333	100,2933	86,88667	78,30667	78,30667	78,30667
	частка, %	55,1182	55,1182	55,1182	54,92721	51,00426	44,71525	38,18299	34,44979	34,44979	34,44979
	з електронною системою керування без рекуперації	107,3333	107,3333	107,3333	107,3333	124	140,6667	149	149	149	149
	частка, %	44,8818	44,8818	44,8818	45,07279	48,99574	55,28475	61,81701	65,55021	65,55021	65,55021
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Тролейбусна мережа										
7а	Сумарний річний пробіг троллейбусів, маш-км	3740100	4266400	4470800	4594700	5249200	5714700	5824300	6381400	5733200	5561600
	Сумарний річний пробіг умовних троллейбусів, маш-км	3904664	4438938	4642754	4726922	5371681	5842914	593925	6502129	5841666	5668819
	Сумарний річний пробіг умовних троллейбусів РК, маш-км	3874744	4062491	4048731	3768315	3551959	3351891	2944328	3156206	2835610	2750737
	Сумарний річний пробіг умовних троллейбусів ЕС, маш-км	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Сумарний річний пробіг умовних троллейбусів ЕР, маш-км	29920,8	376447,1	594022,4	958606,5	1819723	2491023	2992596	3345923	3006056	2916082
7б	Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км	373,6	373,6	375,56	375,56	375,88	423,391	428,049	436,924	427,247	426,831
	Коефіцієнт використання троллейбусної мережі (пробіг за годину)	1,142805	1,303619	1,355232	1,396605	1,594189	1,540805	1,549023	1,66727	1,531842	1,487441
	Коефіцієнт використання троллейбусної мережі умовний	1,193089	1,366339	1,411212	1,436796	1,631387	1,575374	1,583303	1,698813	1,560823	1,515582
8	Кількість троллейбусів за типом	125	135	143	139	150	156	181	185	185	185
8а	Однінарі	114	125	132	131	143	149	174	178	178	178
	з реостатною системою керування	113	113	113	102	91	81	81	81	81	81
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	1	12	19	29	52	68	93	97	97	97
8б	Зчленовані	11	11	11	8	7	7	7	7	7	7
	з реостатною системою керування	11	11	11	8	7	7	7	7	7	7
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8г	Умовних троллейбусів (приєднаних до однінарного)	130,5	141,5	148,5	143	153,5	159,5	184,5	188,5	188,5	188,5
	з реостатною системою керування	129,5	129,5	129,5	114	101,5	91,5	91,5	91,5	91,5	91,5
	частка, %	99,23372	91,51943	87,20539	79,72028	65,12378	57,36677	49,5935	48,54111	48,54111	48,54111
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	1	12	19	29	52	68	93	97	97	97
	частка, %	0,766284	8,480565	12,79451	20,27972	33,87622	42,63323	50,4065	51,45889	51,45889	51,45889

Додаток В. Житомир

На кривих пробігу та витрат електроенергії для Житомира (рис. В.1) спостерігається поступове падіння обсягів руху трамваїв. Водночас, обсяги руху тролейбусів є нерівномірними, з тенденцією до зниження починаючи з 2016 року. Крива витрат електроенергії на тягу за профілем схожа на криву пробігу тролейбусів. Це пояснюється наявністю лише одного трамвайного маршруту в місті та домінуючою роллю тролейбуса.

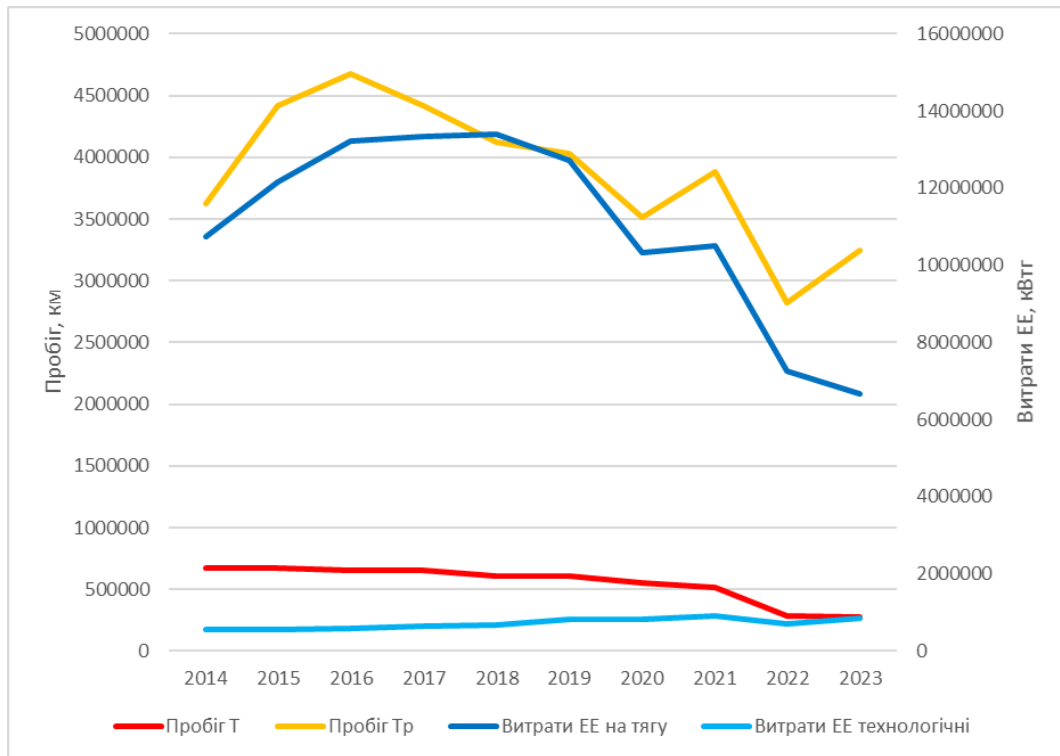


Рисунок В.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Житомир.

Розрахункові значення питомих витрат на 1 км пробігу умовних трамваїв та тролейбусів:

- трамваї з реостатними системами керування – 3,93 кВт·год/км;
- тролейбуси з реостатними системами керування – 2,24 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування без рекуперації – 2,24 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 1,14 кВт·год/км.

Витрати електроенергії підприємством на технологічні потреби за період спостереження збільшилися на 55,8%. При цьому зміни річного пробігу умовних трамваїв склали -57,4%, а тролейбусів -9,7%. Це свідчить про значне зниження енергоефективності нетягових споживачів, до яких належать електроопалення депо та інші потреби ремонтної зони й адміністративних будівель.

Таблиця В.1. Розрахунок показників міста Житомир

Місто, назва підприємства:		Житомир, КП "Житомирське трамвайно-тролейбусне управління"									
№	Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:	12166900	13573200	14738900	14890200	15101200	14534800	12072900	12373600	8924500	8473300
1а	натягу (виміряні натягових підстанціях), кВтг	10738500	12150300	13228800	13348000	13385900	12712200	10342000	10501700	7243500	6660100
	частка %	88,25995	89,51684	89,75432	89,64285	88,6413	87,46044	85,66293	84,87182	81,16421	78,60102
	розрахункове значення	11207993	13123460	13696877	13080451	12334590	12131295	9735244	9856714	6760664	7491690
	різниця / цільова функція	0,001911	0,006415	0,001252	0,000402	0,006168	0,002088	0,003431	0,003772	0,004443	0,01559
	питомі витрати середні, кВтг/км	2,383804	2,265849	2,346331	2,489055	2,644184	2,558806	2,395338	2,259596	2,208439	1,79729
1б	на електроопалення депо, кВтг	875500	862100	913000	884600	1036000	1006400	908200	962700	972000	952000
	частка %	7,195752	6,361487	6,194492	5,94082	6,860382	6,924072	7,522638	7,780274	10,89137	11,23529
	Технологічні витрати	552900	560800	597100	657600	679300	816200	822700	909200	709000	861200
	частка %	4,544296	4,131671	4,051184	4,416328	4,498318	5,615488	6,814435	7,347902	7,944423	10,16369
3	Власні джерела енергії:										
3а	Тип (фотопанелі і т.ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3б	Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3в	Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Кількість депо	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
4а	...з них з електроопаленням	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
5	Трамвайна мережа										
5а	Сумарний річний пробіг трамваїв, ваг-км	668600	672400	656900	651200	608000	609600	556100	513200	288700	273800
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв, ваг-км	761089,7	765415,3	756748,8	750182,4	720358,4	722254,1	658867,3	607063,5	341502,8	323877,6
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв РК, ваг-км	761089,7	765415,3	756748,8	750182,4	720358,4	722254,1	658867,3	607063,5	341502,8	323877,6
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕС, ваг-км	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕР, ваг-км	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5б	Довжина трамвайної мережі в однокільному обчисленні, км	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
	Коефіцієнт використання трамвайної мережі (пробіг за годину)	4,361383	4,386171	4,273354	4,24788	3,96608	3,976517	3,617616	3,347684	1,883235	1,78604
	Коефіцієнт використання трамвайної мережі умовний	4,964708	4,992925	4,936391	4,893558	4,690111	4,711377	4,297895	3,959971	2,227677	2,112705
6	Кількість трамваїв за довжиною	32	32	30	30	25	25	25	23	23	23
6а	14 м	8	8	6	6	2	2	2	2	2	2
	з реостатною системою керування	8	8	6	6	2	2	2	2	2	2
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6б	18 м	24	24	24	24	23	23	23	21	21	21
	з реостатною системою керування	24	24	24	24	23	23	23	21	21	21
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6в	Умовних вагонів (приєднаних до довжини 15 м)	36,42667	36,42667	34,56	34,56	29,62	29,62	29,62	27,20667	27,20667	27,20667
	з реостатною системою керування	36,42667	36,42667	34,56	34,56	29,62	29,62	29,62	27,20667	27,20667	27,20667
	частка %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Тролейбусна мережа										
7а	Сумарний річний пробіг троллейбусів, маш-км	3527100	4416400	4671900	4414600	4122400	4031000	3515000	3887100	2825400	3250000
	Сумарний річний пробіг умовних троллейбусів, маш-км	3743585	4596945	4881330	4612496	4342036	4245766	3658695	4040538	2938416	3381757
	Сумарний річний пробіг умовних троллейбусів РК, маш-км	322528	3458125	3528090	3383784	2922849	2858045	1912248	1841258	1318520	1515203
	Сумарний річний пробіг умовних троллейбусів ЕС, маш-км	352710	972163,5	1159920	1096039	1216446	1189475	795849,1	767190,8	565080	636824,3
	Сумарний річний пробіг умовних троллейбусів ЕР, маш-км	155447,1	166656,6	193320	182673,1	202741	198245,9	950597,5	1432089	1054816	1229730
7б	Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км	96,4	96,4	96,4	99,9	102,2	102,3	100,2	100,2	100,5	101,6
	Коефіцієнт використання троллейбусної мережі (пробіг за годину)	4,295151	5,22926	5,517269	5,044542	4,604634	4,498141	3,993607	4,428472	3,209296	3,65162
	Коефіцієнт використання троллейбусної мережі умовний	4,433209	5,443624	5,780389	5,270677	4,849963	4,737796	4,168256	4,60328	3,337668	3,799658
8	Кількість троллейбусів за типом	140	159	145	145	122	122	159	152	150	148
8а	Однінарні	131	145	132	132	109	109	145	140	138	136
	з реостатною системою керування	117	117	102	102	79	79	79	66	64	63
	з електронною системою керування без рекуперації	8	23	24	24	24	24	24	18	18	17
	з електронною системою керування та рекуперацією	6	6	6	6	6	6	43	56	56	56
8б	Зчленовані	9	13	13	13	13	13	13	12	12	12
	з реостатною системою керування	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4
	з електронною системою керування без рекуперації	4	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8г	Умовних троллейбусів (приєднаних до однінарних)	144,5	165,5	151,5	151,5	128,5	128,5	165,5	158	156	154
	з реостатною системою керування	124,5	124,5	109,5	109,5	86,5	86,5	86,5	72	70	69
	частка %	86,15917	75,2659	72,27723	72,27723	67,31518	67,31518	52,3586	45,56962	44,87179	44,80519
	з електронною системою керування без рекуперації	14	36	36	36	36	36	36	30	30	29
	частка %	9,688581	21,14804	23,76238	23,76238	28,01556	28,01556	21,75227	18,98734	19,23077	18,83117
	з електронною системою керування та рекуперацією	6	6	6	6	6	6	43	56	56	56
	частка %	4,152249	3,625378	3,960396	3,960396	4,669261	4,669261	25,98187	35,44304	35,89744	35,36364

Додаток Г. Запоріжжя

На кривих пробігу та витрат електроенергії Запоріжжя (рис. Г.1) спостерігається значне падіння обсягів руху електротранспорту протягом досліджуваного періоду. Це призводить до зниження ефективності використання наявної дороговартісної інфраструктури підприємства.

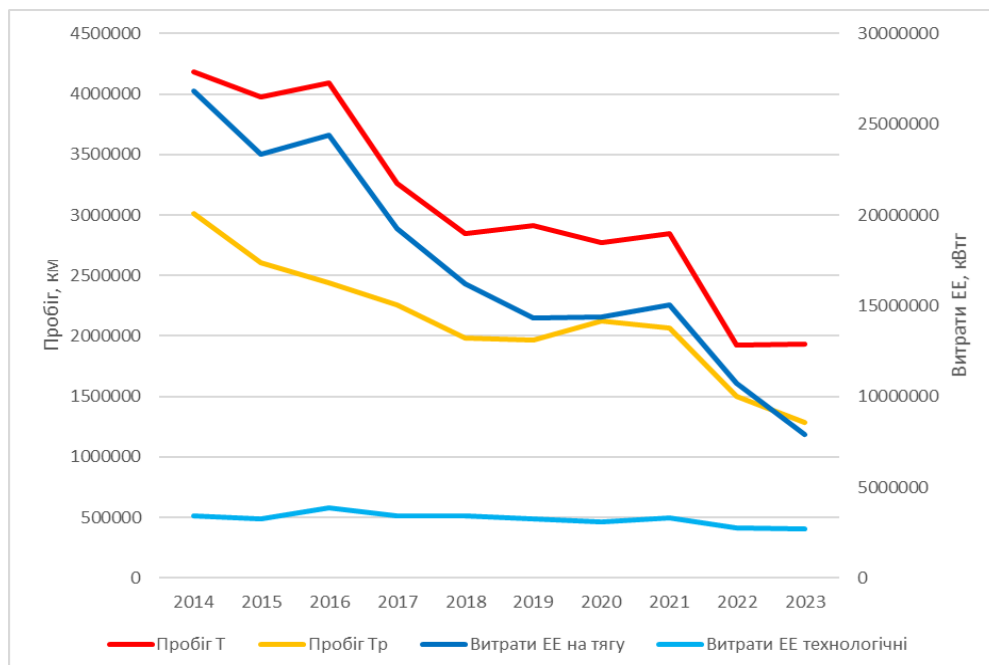


Рисунок Г.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Запоріжжя.

Розрахункові значення

питомих витрат на 1 км пробігу умовних трамваїв та тролейбусів:

- трамваї з реостатними системами керування – 3,66 кВт·год/км;
- трамваї з електронними системами керування без рекуперації – 2,37 кВт·год/км;
- трамваї з електронними системами керування та рекуперацією – 1,31 кВт·год/км;
- тролейбуси з реостатними системами керування – 5,37 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування без рекуперації – 2,09 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 1,33 кВт·год/км.

Серед розрахункових витрат увагу привертає завищений показник для тролейбусів з реостатними системами керування. Це пов'язано з нетиповим випереджаючим падінням витрат на тягу (–70,6%) порівняно зі зменшенням частки тролейбусів з РК (–58,9%). Водночас, показники для тролейбусів з електронними системами керування близькі до аналогічних для трамваїв.

Попри те, що розрахункова модель може мати помітну похибку, збіг цих двох факторів відображає, ймовірно, нижчу ефективність роботи тролейбусної мережі з точки зору втрат. Підприємству варто додатково проаналізувати витрати на тягу окремо по тролейбусних, трамвайних та змішаних підстанціях, стан кабельного господарства та схеми живлення тролейбусних ділянок.

Витрати електроенергії підприємством на технологічні потреби за період спостереження зменшилися на 19,2%, при падінні обсягів руху понад 50%. При цьому депо не мають електроопалення – найбільшої постійної складової нетягових витрат електроенергії. Тобто, як і було зазначено на початку, значне падіння обсягів руху електротранспорту призвело до зниження ефективності наявної інфраструктури підприємства, зокрема зростання технологічних витрат на умовну одиницю пробігу, які й без того є одними з найвищих серед досліджуваних підприємств України.

У випадку стабілізації воєнної ситуації підприємству вкрай необхідно провести енергоаудит нетягових споживачів та оптимізувати їх роботу.

Таблиця Г.1. Розрахунок показників міста Запоріжжя

Місто, назва підприємства: Запоріжжя, КП "Запоріжжелектротранс"											
№	Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:	305 76 230	26890700	28606287	23009 783	19923564	179 18 255	17798625	186255 27	138 38072	10913922
1а	натягу (виміряні на тягових підстанціях), кВтг	268 39 450	233280 70	24418130	192 76 205	16 190 256	14351004	1439 79 24	15027389	10758 38 4	7893796
	частка, %	87,77881	86,75144	85,35931	83,77396	81,26144	80,09153	80,89346	80,68168	77,74482	72,32777
	розрахункове значення	27306 214	24327151	2330 2454	19306 374	15 4388 12	14503114	1450755 2	139238 12	9682471	9093374
	різниця / цілюва функція	0,000302	0,001834	0,002088	2,45Е-06	0,002154	0,000112	5,8Е-05	0,005393	0,010001	0,02093
	питомі витрати середні, кВтг/км	3,770818	3,611252	3,814199	3,563662	3,36 75 17	2,898 106	2,837335	2,905738	2,968898	2,322521
1б	на електроопалення депо, кВтг	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Технологічні витрати	3735 780	356 26 30	4188157	3738577	3733408	3567251	3400 70 1	3598138	30 79688	3020 126
	частка, %	12,22119	13,24856	14,64069	16,22604	18,73856	19,90847	19,10654	19,31832	22,25518	27,67223
3	Власні джерела енергії:										
3а	Тип (фотопанелі і т.ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3б	Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3в	Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Кількість депо	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4а	...з них з електроопаленням	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Трамвайна мережа										
5а	Сумарний річний пробіг трамваїв, ваг-км	4183900	3975100	4089100	3257900	2843500	2911400	2774700	2846200	1923000	1931900
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв, ваг-км	40 45986	3844069	3951202	3156000	2827272	2907022	2770528	290 46 48	19 78984	1988143
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв РК, ваг-км	2386373	2267279	2258092	1799085	1306861	1246 284	1187766	10276 79	645611,5	648599,5
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕС, ваг-км	1659614	1576790	1703110	1366915	13885 76	1437458	1369965	1665062	1192260	1197778
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕР, ваг-км	0	0	0	0	1318 35	223280,3	212796,5	211906,9	141112,2	141765,3
5б	Довжина трамвайної мережі в однокільному обчисленні, км	100,55	100,55	100,55	100,55	100,55	100,55	100,55	100,55	100,55	100,55
	Коефіцієнт використання тамвайної мережі (пробіг за годину)	4,750016	4,512964	4,629705	3,698721	3,228249	3,305337	3,141533	3,291315	2,183198	2,193302
	Коефіцієнт використання тамвайної мережі умовний	4,593442	4,354203	4,497186	3,583033	3,209825	3,300366	3,145403	3,29767	2,246757	2,257155
6	Кількість трамваїв за довжиною	126	126	120	120	132	133	133	137	139	139
6а	14-15 м	77	77	71	71	65	61	61	53	50	50
	з реостатною системою керування	77	77	71	71	65	61	61	53	50	50
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6б	15-16 м	49	49	49	49	55	59	59	59	59	59
	з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування без рекуперації	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	6	10	10	10	10	10
6в	18-19 м	0	0	0	0	12	13	13	25	30	30
	з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	12	13	13	25	30	30
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6ж	Умовних вагонів (приведених до довжини 15 м)	121,8467	121,8467	116,2467	116,2467	131,2467	132,8	132,8	139,8138	143,0467	143,0467
	з реостатною системою керування	71,86667	71,86667	66,26667	66,26667	60,66667	56,93333	56,93333	49,46667	46,66667	46,66667
	частка, %	58,98123	58,98123	57,00522	57,00522	46,2234	42,87149	42,87149	35,38051	32,62339	32,62339
	з електронною системою керування без рекуперації	49,98	49,98	49,98	49,98	64,46	65,66667	65,66667	80,14667	86,18	86,18
	частка, %	41,01877	41,01877	42,99478	42,99478	49,11363	49,44779	49,44779	57,32405	60,24607	60,24607
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	6,12	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
	частка, %	0	0	0	0	4,662976	7,680723	7,680723	7,295442	7,13054	7,13054
7	Тролейбусна мережа										
7а	Сумарний річний пробіг троллейбусів, маш-км	3009000	2603000	2440700	2253100	1980500	1969100	2126700	2068900	1501000	1287400
	Сумарний річний пробіг умовних троллейбусів, маш-км	30 71688	2615780	2440700	2253100	1980500	20 44835	2203925	2266986	16 44713	1410662
	Сумарний річний пробіг умовних троллейбусів РК, маш-км	2585859	2181926	1901177	1583259	1091296	795 2135	748283,3	572248,9	415170,2	36089,4
	Сумарний річний пробіг умовних троллейбусів ЕС, маш-км	1410 46,9	0	102766,3	15 2235,5	202091,8	416540,4	728591,7	814354,3	590819,1	506742,6
	Сумарний річний пробіг умовних троллейбусів ЕР, маш-км	344781,3	4338 33,3	436 756,8	517604,1	687112,2	833060,8	827050	880383	638723,4	547829,8
7б	Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км	188,441	188,441	188,441	188,441	188,441	188,441	188,441	188,441	188,441	188,441
	Коефіцієнт використання троллейбусної мережі (пробіг за годину)	1,822815	1,576866	1,474506	1,3649	1,199763	1,192857	1,284809	1,253314	0,909287	0,779891
	Коефіцієнт використання троллейбусної мережі умовний	1,860791	1,584595	1,478546	1,3649	1,199763	1,238735	1,39569	1,373312	0,996347	0,854562
8	Кількість троллейбусів за типом	96	102	95	74	49	52	54	47	47	47
8а	Однінарі	92	101	95	74	49	48	45	38	38	38
	з реостатною системою керування	81	84	74	52	27	21	19	13	13	13
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	4	5	5	5	5	5	5	5
	з електронною системою керування та рекуперацією	11	17	17	17	17	22	21	20	20	20
8б	Зчленовані	4	1	0	0	0	4	9	9	9	9
	з реостатною системою керування	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування без рекуперації	3	0	0	0	0	4	9	9	9	9
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8г	Умовних троллейбусів (приведених до одиниці)	98	102,5	95	74	49	54	58,5	51,5	51,5	51,5
	з реостатною системою керування	82,5	85,5	74	52	27	21	19	13	13	13
	частка, %	84,18357	83,41463	77,89474	70,27027	55,10204	38,88889	32,47863	25,24272	25,24272	25,24272
	з електронною системою керування без рекуперації	4,5	0	4	5	5	11	18,5	18,5	18,5	18,5
	частка, %	4,591837	0	4,210526	6,756757	10,20408	20,37037	31,62393	35,92233	35,92233	35,92233
	з електронною системою керування та рекуперацією	11	17	17	17	17	22	21	20	20	20
	частка, %	11,22449	16,58537	17,89474	22,97297	34,69388	40,74074	35,89744	38,83495	38,83495	38,83495

Додаток Д. Івано-Франківськ

На кривих пробігу та витрат електроенергії Івано-Франківська (рис. Д.1) спостерігається поступове збільшення обсягів руху тролейбусів, з тимчасовим падінням у 2020 році під час першої хвилі пандемії COVID-19.

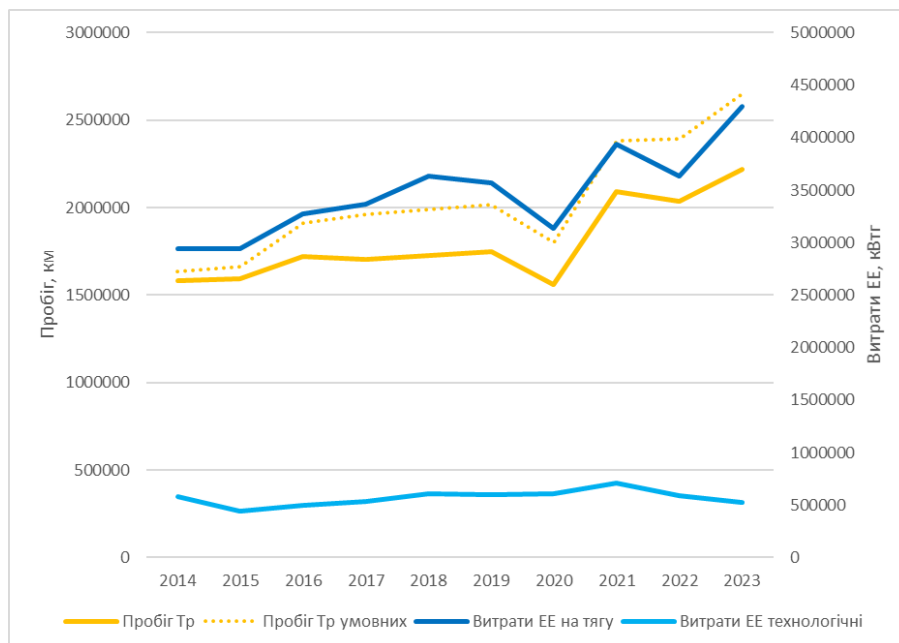


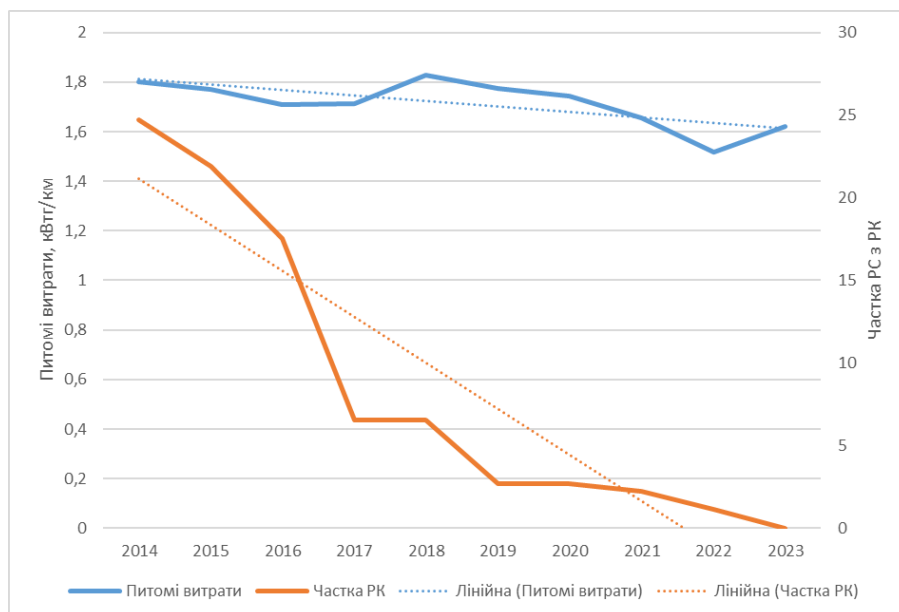
Рисунок Д.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Івано-Франківськ.

Розрахункові значення питомих

витрат на 1 км пробігу умовних тролейбусів:

- тролейбуси з реостатними системами керування – 1,82 кВт-год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування без рекуперації – 1,82 кВт-год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 1,33 кВт-год/км.

Питомі витрати є не високими порівняно з іншими підприємствами.



За 10 років частка рухомого складу в умовних одиницях з реостатними системами керування була зменшена з 24,7% до 0%. Натомість, частка тролейбусів з електронними системами керування збільшилася з 10,8% до 40,7%, що забезпечило зниження середніх питомих витрат на тягу на 10% (рис. Д.2).

Рисунок Д.2. Криві питомих витрат на тягу та частки рухомого складу з РК системами міста Івано-Франківськ.

Витрати електроенергії на технологічні потреби протягом

досліджуваного періоду є досить рівномірними. Єдине депо підприємства має електроопалення, яке не залежить від пробігів рухомого складу. Проте, немає помітного збільшення змінної складової, пов'язаної з ремонтом рухомого складу, обсяги якого залежать від пробігу. Таким чином, ефективність роботи підприємства з точки зору витрат електроенергії є досить високою.

Таблиця Д.1. Розрахунок показників міста Івано-Франківськ

Місто, назва підприємства: Івано-Франківськ, КП "Електроавтотранс"											
№	Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:	3641205	3567392	3953453	4081957	4430547	4361912	3928293	4834714	4407072	5005806
1а	натягу (виміряні натягових підстанціях), кВтг	2942458	2943458	3270459	3365004	3636663	3572880	3138189	3941968	3632208	4293491
	частка, %	80,81	82,5101	82,7241	82,436	82,0816	81,9109	79,8868	81,5347	82,4177	85,7702
	розрахункове значення	2882986	2934636	3399719	3487655	3536288	3374485	3014121	3890817	3889302	4285747
	різниця / цільова функція	0,00041	9Е-06	0,00156	0,00133	0,00076	0,00308	0,00156	0,00017	0,00501	3,3Е-06
	питомі витрати середні, кВтг/км	1,80121	1,77176	1,70905	1,71476	1,82771	1,77269	1,74317	1,65457	1,51922	1,62169
1б	на електроопалення депо, кВтг	115705	181320	183550	185708	184402	186135	185908	187855	186209	184310
	частка, %	3,93226	6,1601	5,61236	5,5188	5,07064	5,20966	5,92405	4,76551	5,12661	4,29278
	Технологічні витрати	583042	442614	499444	531245	609482	602897	604196	704891	588655	528005
	частка, %	16,0123	12,4072	12,6331	13,0145	13,7564	13,8219	15,3806	14,5798	13,3571	10,5479
3	Власні джерела енергії:										
3а	Тип (фотопанелі і т. ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3б	Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3в	Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Кількість депо	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4а	...з них з електроопаленням	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	Тролейбусна мережа										
7а	Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш-км	1580900	1592100	1722249	1705011	1728786	1746781	1560241	2091285	2033591	2219495
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів, маш-км	1633597	1661322	1913610	1962371	1989735	2015517	1800278	2382477	2390843	2647540
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів РК, маш-км	404008	363414	334882	128680	130474	53747,1	48007,4	52943,9	27481	0
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕС, маш-км	1053933	1124853	1419261	1672841	1696167	1370551	1224189	1429486	1429010	1569500
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕР, маш-км	175656	173054	159468	160850	163093	591218	528082	900047	934353	1078040
7б	Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км	61,91	61,91	61,91	64,69	65,89	65,89	65,89	65,89	65,89	73,19
	Коефіцієнт використання тролейбусної мережі (пріздів за годину)	2,91501	2,93566	3,16696	3,00875	2,99514	3,02632	2,69575	3,62318	3,52322	3,46177
	Коефіцієнт використання тролейбусної мережі умовний	3,01217	3,0633	3,52849	3,4629	3,44724	3,49191	3,119	4,12767	4,14217	4,1294
8	Кількість тролейбусів за типом	45	46	54	53	53	65	65	79	74	70
8а	Одинарні	42	42	42	37	37	45	45	57	48	43
	з реостатною системою керування	7	6	6	4	4	2	2	2	1	0
	з електронною системою керування без рекуперації	30	31	31	28	28	21	21	21	13	9
	з електронною системою керування та рекуперацією	5	5	5	5	5	22	22	34	34	34
8б	Зчленовані	3	4	12	16	16	20	20	22	26	27
	з реостатною системою керування	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування без рекуперації	0	1	9	16	16	20	20	22	26	27
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8г	Умовних тролейбусів (приведених до одинарного)	46,5	48	60	61	61	75	75	90	87	83,5
	з реостатною системою керування	11,5	10,5	10,5	4	4	2	2	2	1	0
	частка, %	24,7312	21,875	17,5	6,55738	6,55738	2,66667	2,66667	2,22222	1,14943	0
	з електронною системою керування без рекуперації	30	32,5	44,5	52	52	51	51	54	52	49,5
	частка, %	64,5161	67,7083	74,1667	85,2459	85,2459	68	68	60	59,7701	59,2814
	з електронною системою керування та рекуперацією	5	5	5	5	5	22	22	34	34	34
	частка, %	10,7527	10,4167	8,33333	8,19672	8,19672	29,3333	29,3333	37,7778	39,0805	40,7186

Додаток Е. Кам'янське

На кривих пробігу та витрат електроенергії Кам'янського (рис. Е.1) спостерігається збільшення обсягів руху трамваїв після 2017 року. При цьому крива витрат електроенергії на тягу має «провал» у 2020 році, що може бути пов'язано з введенням обмежень під час пандемії COVID-19. Ці обмеження призвели до зниження завантаженості вагонів і, як наслідок, менших витрат на їхню роботу.

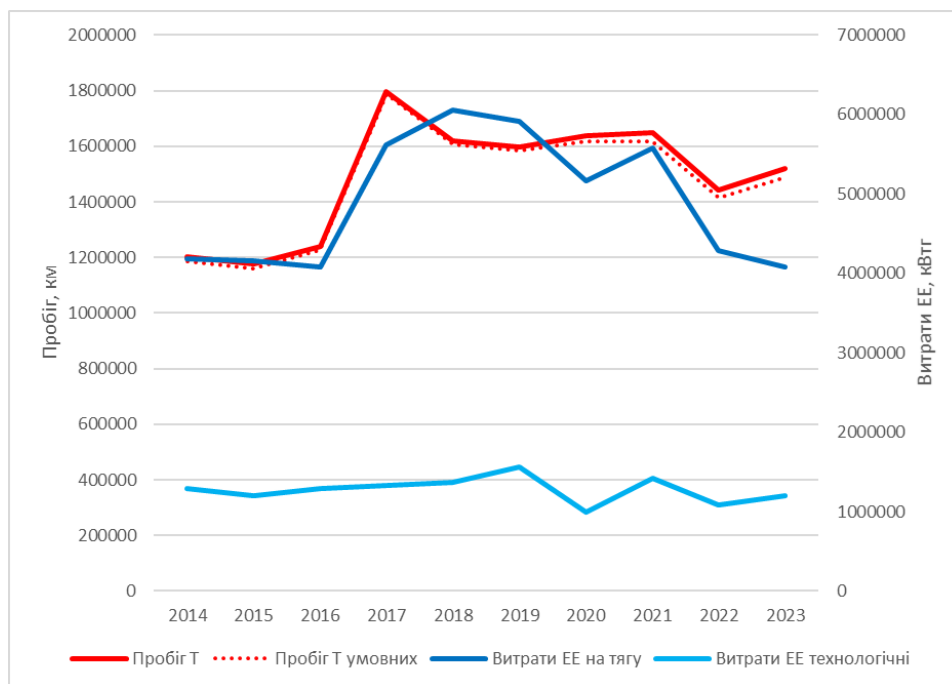
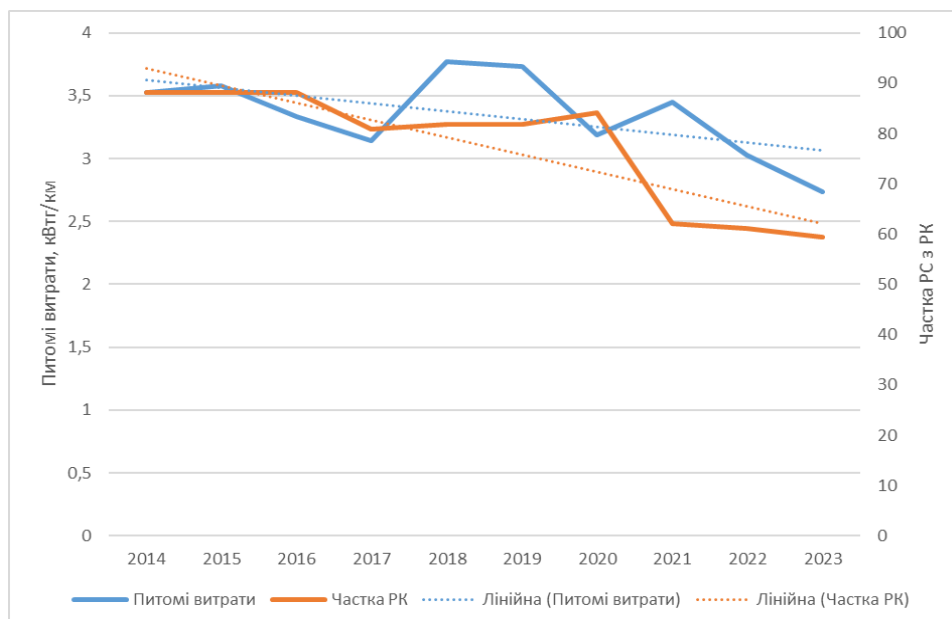


Рисунок Е.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Кам'янське.

Розрахункові значення

питомих витрат на 1 км пробігу умовних трамваїв:

- трамваї з реостатними системами керування – 3,71 кВт·год/км;
- трамваї з електронними системами керування без рекуперації – 1,93 кВт·год/км.



За 10 років частка рухомого складу в умовних одиницях з реостатними системами керування зменшилася на 28,7%. Це забезпечило зниження середніх питомих витрат на тягу на 22,3% (рис. Е.2).

Рисунок Е.2. Криві питомих витрат на тягу та частки рухомого складу з РК системами міста Кам'янське.

Витрати електроенергії на технологічні потреби протягом досліджуваного періоду коливаються, але залежність від обсягів руху не простежується. Частка технологічних витрат, при тому що єдине депо підприємства не має електроопалення, коливається на рівні 20%. Це є високим показником порівняно з іншими містами, а в абсолютних цифрах на депо або 1 кілометр пробігу — одні з найвищих серед досліджуваних міст України. Підприємству необхідно звернути особливу увагу на велике електроспоживання нетягових споживачів та суттєво підвищити енергоефективність технологічних процесів.

Таблиця Е.1. Розрахунок показників міста Кам'янське

Місто, назва підприємства: Кам'янське, КП КМР "Транспорт"											
№	Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:	5471000	5358000	5373000	6953000	7420000	7470000	6152000	6995000	5362000	5280000
1а	натягу (виміряні натягових підстанціях), кВтг	4179000	4153000	4085000	5622000	6055000	5914000	5164000	5576000	4281000	4074000
	частка, %	76,3846	77,5103	76,0283	80,8572	81,6038	79,17	83,9402	79,7141	79,8396	77,1591
	розрахункове значення	4151070	4062475	4284310	6024362	5441518	5368877	5547162	4913061	4273922	4452483
	різниця / цільова функція	4,5Е-05	0,00048	0,00238	0,00512	0,01027	0,0085	0,00551	0,01414	2,7Е-06	0,00863
	питомі витрати середні, кВтг/км	3,52172	3,57613	3,33544	3,14336	3,76954	3,73158	3,19075	3,44621	3,02331	2,73499
1б	на електроопалення депо, кВтг	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Технологічні витрати	1292000	1205000	1288000	1331000	1365000	1556000	988000	1419000	1081000	1206000
	частка, %	23,6154	22,4897	23,9717	19,1428	18,3962	20,83	16,0598	20,2859	20,1604	22,8409
3	Власні джерела енергії:										
3а	Тип (фотопанелі і т.ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3б	Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3в	Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Кількість депо	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4а	...з них з електроопаленням	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Трамвайна мережа										
5а	Сумарний річний пробіг трамваїв, ваг-км	1201112	1175477	1239665	1797521	1618353	1596749	1638878	1650424	1443261	1519336
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв, ваг-км	1186637	1161311	1224725	1788533	1606295	1584852	1618427	1618010	1415999	1489582
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв РК, ваг-км	1045275	1022966	1078826	1444758	1314991	1297437	1361249	1004826	864888	885330
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕС, ваг-км	141362	138345	145899	343776	291304	287415	257178	613185	551112	604253
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕР, ваг-км	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5б	Довжина трамвайної мережі в одноколіїному обчисленні, км	77,9	77,9	77,9	77,9	77,9	77,9	77,9	77,9	77,9	77,9
	Коефіцієнт використання трамвайної мережі (пробіг за годину)	1,76012	1,72255	1,81165	2,6341	2,37155	2,33989	2,39506	2,41854	2,11497	2,22645
	Коефіцієнт використання трамвайної мережі умовний	1,73891	1,70179	1,79472	2,62093	2,35388	2,32245	2,37166	2,37104	2,07502	2,18285
6	Кількість трамваїв за довжиною	52	52	52	32	34	34	39	37	36	32
6а	14-15 м	25	25	25	12	14	14	19	22	21	19
	з реостатною системою керування	25	25	25	12	14	14	19	14	13	11
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	8	8	8
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6б	15-16 м	27	27	27	20	20	20	20	15	15	13
	з реостатною системою керування	21	21	21	14	14	14	14	9	9	8
	з електронною системою керування без рекуперації	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6ж	Умовних вагонів (приведених до довжини 15 м)	51,3733	51,3733	51,3733	31,84	33,7467	33,7467	38,5133	36,2733	35,32	31,3733
	з реостатною системою керування	45,2533	45,2533	45,2533	25,72	27,6267	27,6267	32,3933	22,5267	21,5733	18,6467
	частка, %	88,0872	88,0872	88,0872	80,7789	81,8649	81,8649	84,1094	62,1026	61,0797	59,4348
	з електронною системою керування без рекуперації	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	13,7467	13,7467	12,7267
	частка, %	11,9128	11,9128	11,9128	19,2211	18,1351	18,1351	15,8906	37,8974	38,9203	40,5652
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Додаток Є. Конотоп

Криві пробігу та витрат електроенергії Конотопа на рис. Є.1 мають значні коливання протягом досліджуваного періоду. Це свідчить про нестабільність роботи цього виду транспорту в місті.

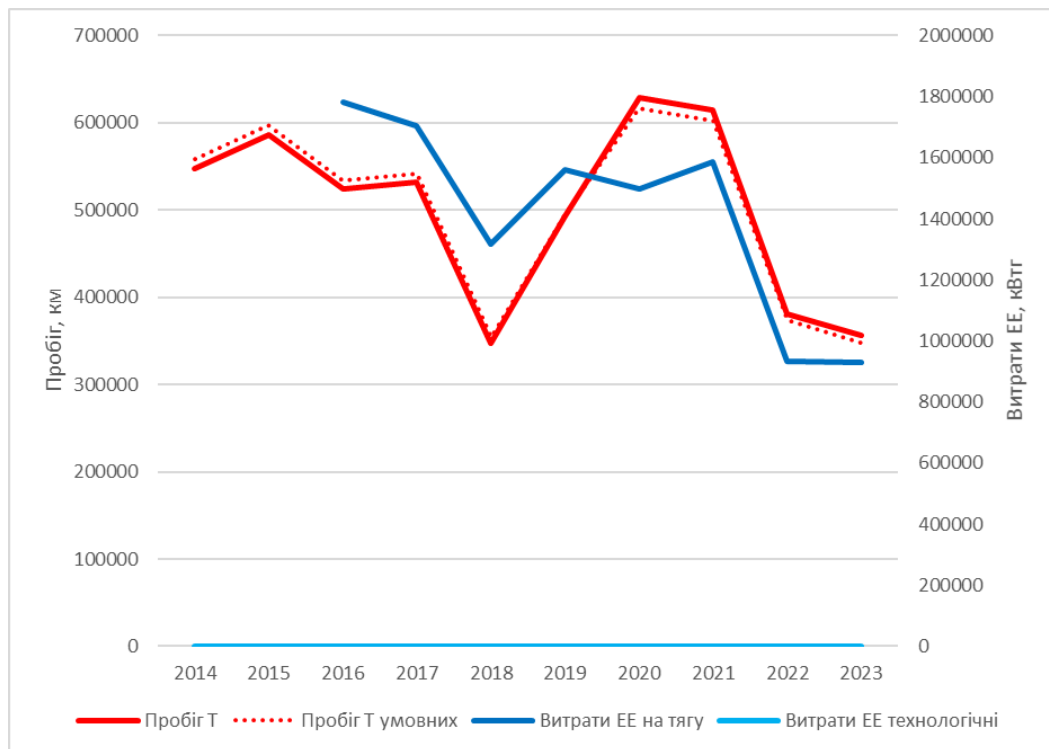


Рисунок Є.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Конотоп.

Підприємство не веде окремий облік витрат

електроенергії на тягу та на технологічні потреби.

Для можливості порівняння питомих витрат на 1 км пробігу з іншими містами, необхідно виключити витрати на технологічні потреби. Для цього обрали міста зі співмірною інтенсивністю руху трамваїв (Кам'янське та Миколаїв) і розрахували частку витрат на технологічні потреби відносно загальних витрат електроенергії. Ці значення за 10 років склали 20,6% та 19,4%. Для Конотопа було прийняте середнє значення 20%, при цьому частка постійної та змінної (залежної від обсягів руху) складової також прийнята аналогічною до обраних міст.

Розрахункові значення питомих витрат на 1 км пробігу умовних трамваїв:

- Трамваї з реостатними системами керування – 2,87 кВт·год/км;
- Трамваї з електронними системами керування без рекуперації – 2,10 кВт·год/км;
- Трамваї з електронними системами керування з рекуперацією – 1,01 кВт·год/км.

За 8 років частка рухомого складу в умовних одиницях з реостатними системами керування зменшилася на 49,8%, що забезпечило зниження середніх питомих витрат на тягу на 29,7% (рис. Є.2).

Примітка: дані по витратах електроенергії за 2014-2015 роки не були надані, тому для аналізу буз зменшений з 10 до 8 років

Розраховані значення витрат на технологічні потреби наведені у табл Є.1 використано лише для коректної оцінки питомих витрат на тягу. Порівняння їх із заміряними даними по інших підприємствах не має практичного сенсу і не виконувалося.

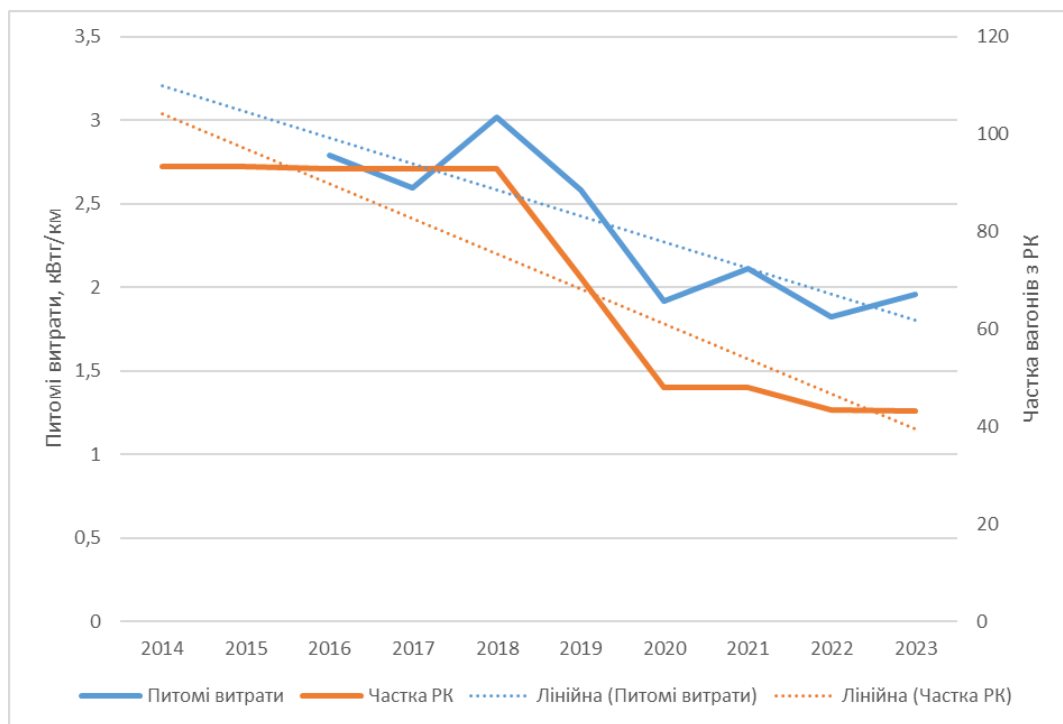


Рисунок Є.2. Криві питомих витрат на тягу та частки рухомого складу з РК системами міста Конотоп.

Таблиця Є.1. Розрахунок

показників міста Конотоп

Місто, назва підприємства:		Конотоп, КП "Конотопське транспортне управління"									
№	Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:			1782200	1702500	1317900	1560400	1499400	1587400	934500	928300
1а	натягу (оцінка), кВтг			1489478	1407887	1069711	1275369	1180301	1271756	677813	677766
	частка, %			83,5752	82,6953	81,1678	81,7335	78,7182	80,1157	72,5321	73,0115
	розрахункове значення	1575666	1685871	1505813	1527365	998319	1190185	1228311	1201540	713709	660615
	різниця / цільова функція			0,00012	0,0072	0,00445	0,00446	0,00165	0,00305	0,0028	0,00064
	питомі витрати середні, кВтг/км			2,78678	2,59695	3,01881	2,58433	1,91599	2,11044	1,82106	1,95999
1б	на електроопалення депо, кВтг			0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %			0	0	0	0	0	0	0	0
	Технологічні витрати (оцінка)			292722	294613	248189	285031	319099	315644	256687	250534
	частка, %			16,4248	17,3047	18,8322	18,2665	21,2818	19,8843	27,4679	26,9885
3	Власні джерела енергії:										
3а	Тип (фотопанелі і т.ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3б	Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3в	Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Кількість депо	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4а	...з них з електроопаленням	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Трамвайна мережа										
5а	Сумарний річний пробіг трамваїв, ваг-км	547600	585900	524000	531500	347400	493500	628600	614900	381100	356700
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв, ваг-км	558552	597618	534480	542130	354348	493500	616028	602602	372208	345801
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв РК, ваг-км	521315	557777	496303	503406	329037	348487	295926	289476	161968	149021
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕС, ваг-км	37236,8	39841,2	38177,1	38723,6	25310,6	38720,8	49320,9	48246	32393,5	30319,5
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕР, ваг-км	0	0	0	0	0	106292	270782	264880	177847	166460
5б	Довжина трамвайної мережі в одноколіїному обчисленні, км	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8
	Коефіцієнт використання трамвайної мережі (проїздів за годину)	2,24861	2,40588	2,14582	2,1825	1,42653	2,02646	2,57417	2,52497	1,56491	1,46472
	Коефіцієнт використання трамвайної мережі умовний	2,29358	2,454	2,19474	2,22615	1,45506	2,02646	2,5296	2,47447	1,5284	1,41996
6	Кількість трамваїв за довжиною	15	15	14	14	14	13	13	13	12	12
6а	13-15 м	0	0	0	0	0	3	6	6	6	7
	з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	3	6	6	6	6
6б	15-16 м	15	15	14	14	14	10	7	7	6	5
	з реостатною системою керування	14	14	13	13	13	9	6	6	5	4
	з електронною системою керування без рекуперації	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6ж	Умовних вагонів (приведених до довжини 15 м)	15,3	15,3	14,28	14,28	14,28	13	12,74	12,74	11,72	11,6333
	з реостатною системою керування	14,28	14,28	13,26	13,26	13,26	9,18	6,12	6,12	5,1	5,01333
	частка, %	93,3333	93,3333	92,8571	92,8571	92,8571	70,6154	48,0377	48,0377	43,5154	43,0946
	з електронною системою керування без рекуперації	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	частка, %	6,66667	6,66667	7,14286	7,14286	7,14286	7,84615	8,00628	8,00628	8,70307	8,76791
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	2,8	5,6	5,6	5,6	5,6
	частка, %	0	0	0	0	0	21,5385	43,956	43,956	47,7816	48,1375

Додаток Ж. Луцьк

На кривих пробігу та витрат електроенергії Луцька (рис. Ж.1) видно суттєві коливання обсягів руху тролейбусів під час критичних подій в Україні, таких як пандемія COVID-19 та початок повномасштабного вторгнення РФ. Останній та перший рік досліджуваного періоду є співставними, але виділяються два періоди: зростання обсягів руху у 2014-2016 роках та поступове падіння у 2016-2023 роках.

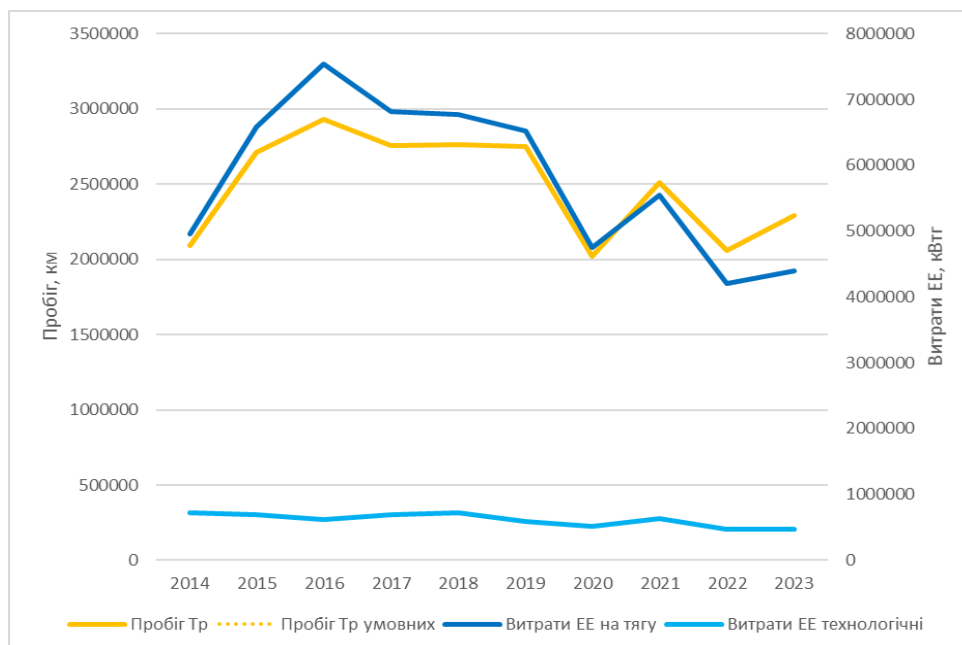


Рисунок Ж.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Луцьк.

Розрахункові значення питомих витрат на 1 км пробігу умовних тролейбусів:

- тролейбуси з реостатними системами керування – 2,56 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування без рекуперації – 2,56 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 1,52 кВт·год/км.

За 10 років частка рухомого складу в умовних одиницях з реостатними системами керування зменшилася на **46,3%**. Це забезпечило зниження середніх питомих витрат на тягу на **19,2%** (рис. Ж.2).

Примітка: У розрахунку на 2022 та 2023 роки кількість машин з реостатними системами прийнято на 9 менше від балансової. Це пояснюється тим, що за даними [2], [3] було ідентифіковано 9 машин, які були відсторонені від роботи в ці роки

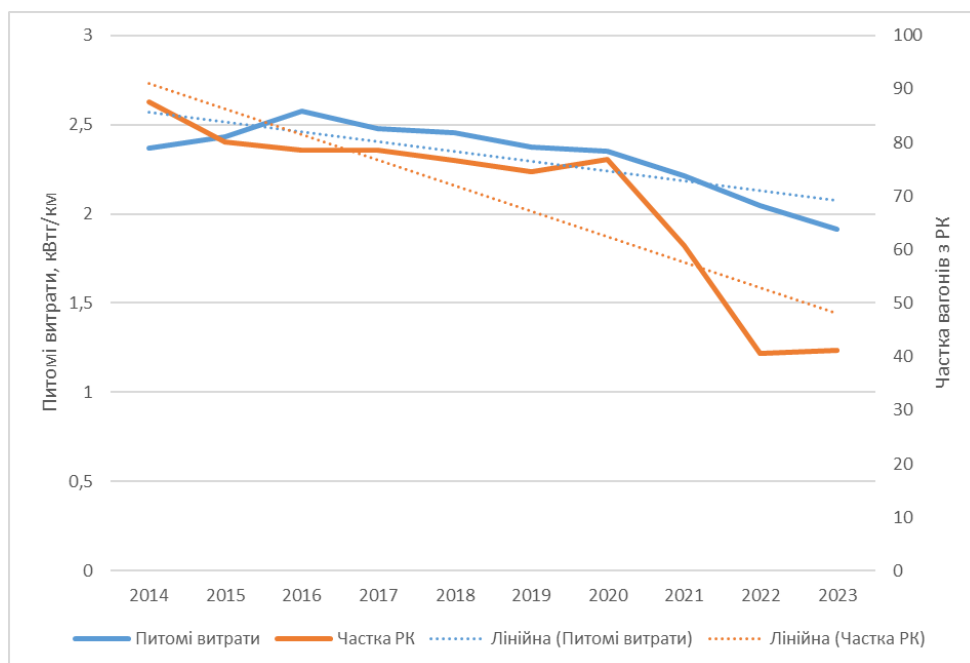


Рисунок Ж.2. Криві питомих витрат на тягу та частки рухомого складу з РК системами міста Луцьк.

У 2016 році єдине тролейбусне депо було переведено на електроопалення. З цього року підприємство почало надавати дані щодо витрат електроенергії на опалення. Однак, ці дані, вочевидь, є розрахунковими, оскільки інші технологічні витрати в такому випадку при розрахунку зменшуються і майже повністю зникають у 2023 році. Тому надані витрати на опалення не були використані окремо в розрахунковій таблиці (їх прирівняли до 0), а включили до загальних технологічних витрат. Навіть після їхнього включення до загальних витрат спостерігається тенденція до їхнього зменшення.

Протягом всього періоду спостереження витрати на технологічні потреби, включно з електроопаленням, зменшилися на 35,0%, тоді як обсяги руху зросли на 9,5%. Таким чином, ефективність роботи підприємства є досить високою, що свідчить про значну роботу, проведenu за попередні 10 років для підвищення енергоефективності нетягових споживачів.

Таблиця Ж.1. Розрахунок показників міста Луцьк

Місто, назва підприємства: Луцьк, КП "Луцьке підприємство електротранспорту"										
Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:	5678580	7282113	8161268	7512236	7499484	7107755	5272809	6189865	4680113	4859243
натягу (виміряні на тягових підстанціях), кВтг	4963490	6583672	7545573	6822645	6779472	6522878	4757384	5552406	4208933	4394421
частка, %	87,4072	90,4088	92,4559	90,8204	90,3992	91,7713	90,2248	89,7016	89,9323	90,4343
розрахункове значення	5116123	6628804	7168530	6739581	6726396	6668757	4810655	5534715	4210766	4689978
різниця / цільова функція	0,00095	4,7E-05	0,0025	0,00015	6,1E-05	0,0005	0,00013	1E-05	1,9E-07	0,00452
питомі витрати середні, кВтг/км	2,37057	2,42856	2,57382	2,47535	2,45512	2,37184	2,35102	2,21189	2,04425	1,91592
на електроопалення депо, кВтг	0	0	0	0	0	0	0	392890	339240	258690
частка, %	0	0	0	0	0	0	0	7,07603	8,06	5,88678
Технологічні витрати	715090	698441	615695	689591	720012	584877	515425	244569	131940	206132
частка, %	12,5928	9,59119	7,54411	9,17957	9,60082	8,22872	9,77515	3,95112	2,81916	4,24206
Власні джерела енергії:										
Тип (фотопанелі і т. ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Кількість депо	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
...з них з електроопаленням	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Тролейбусна мережа										
Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш-км	2093800	2710935	2931663	2756239	2761365	2750131	2023539	2510257	2058909	2293640
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів, маш-км	2093800	2710935	2931663	2756239	2761365	2750131	2023539	2510257	2058909	2293640
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів РК, маш-км	1832075	2168748	2300228	2162587	2117047	2050098	1556568	1524085	987148	1102139
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕС, маш-км	32715,6	250240	315718	296826	322159	350017	116743	134478	56408,5	59575,1
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕР, маш-км	229009	291947	315718	296826	322159	350017	350228	851694	1015352	1131926
Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км	109,15	109,15	109,15	109,15	109,15	109,15	109,15	109,15	109,15	109,15
Коефіцієнт використання тролейбусної мережі (пріздів за годину)	2,18981	2,83525	3,05772	2,88263	2,88799	2,87624	2,11055	2,62537	2,15332	2,39882
Коефіцієнт використання тролейбусної мережі умовний	2,18981	2,83525	3,0661	2,88263	2,88799	2,87624	2,11633	2,62537	2,15332	2,39882
Кількість тролейбусів за типом	64	65	65	65	60	55	52	56	73	77
Одинарні	64	65	65	65	60	55	52	56	73	77
з реостатною системою керування	56	52	51	51	46	41	40	34	35	37
з електронною системою керування без рекуперації	1	6	7	7	7	7	3	3	2	2
з електронною системою керування та рекуперацією	7	7	7	7	7	7	9	19	36	38
Зчленовані	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Умовних тролейбусів (приведених до одинарного)	64	65	65	65	60	55	52	56	73	77
з реостатною системою керування	56	52	51	51	46	41	40	34	35	37
частка, %	87,5	80	78,4615	78,4615	76,6667	74,5455	76,9231	60,7143	47,9452	48,0519
з електронною системою керування без рекуперації	1	6	7	7	7	7	3	3	2	2
частка, %	1,5625	9,23077	10,7692	10,7692	11,6667	12,7273	5,76923	5,35714	2,73973	2,5974
з електронною системою керування та рекуперацією	7	7	7	7	7	7	9	19	36	38
частка, %	10,9375	10,7692	10,7692	10,7692	11,6667	12,7273	17,3077	33,9286	49,3151	49,3506

Додаток 3. Львів

На кривих пробігу та витрат електроенергії Львова (рис. 3.1) помітне зростання обсягів руху у 2019 році та поступове зростання обсягів руху тролейбусів з 2020 року. Водночас, крива витрат електроенергії на тягу, хоча й має деякі коливання, за весь період дослідження значного приросту не показує. Це зумовлено тим, що частка рухомого складу з економічними електронними системами керування зростала значно швидше, ніж обсяги руху.

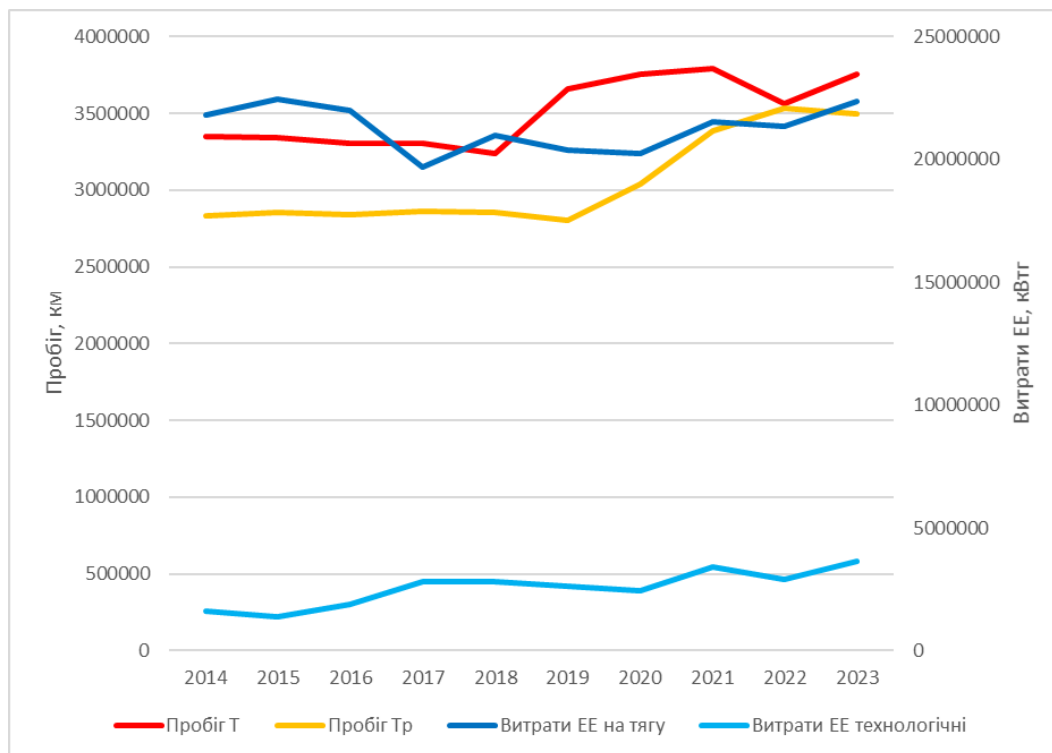


Рисунок 3.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Львів.

Розрахункові значення питомих витрат на 1 км пробігу умовних трамваїв та тролейбусів:

- трамваї з реостатними системами керування – 4,3 кВт·год/км;
- трамваї з електронними системами керування без рекуперації – 3,04 кВт·год/км;
- трамваї з електронними системами керування з рекуперацією – 2,94 кВт·год/км;
- тролейбуси з реостатними системами керування – 2,37 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування без рекуперації – 1,92 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 0,92 кВт·год/км.

Попри заміну рухомого складу на більш економічний, питомі витрати для трамваїв все одно залишаються досить високими порівняно з іншими містами. Це може бути пов'язано з підвищеними втратами в тяговій мережі як через більший коефіцієнт використання трамвайної мережі (у Львові він становить 6,27, що в 1,5 раза вище середнього по Україні), так і через поганий стан самої контактної та кабельної мережі 600 В. Підприємству потрібно звернути на це увагу.

Витрати електроенергії підприємством на технологічні потреби за період спостереження збільшилися на 123,6%. При цьому річний пробіг умовних трамваїв зріс на 17,3%, а тролейбусів – на 22%. Найрізкіші збільшення відбулися у 2017 та 2021 роках. До 2017 року всі три депо мали електроопалення, яке є одним з найбільших технологічних споживачів. У 2021 році відновлено роботу основного трамвайного депо після реконструкції. Реконструкція мала б зменшити споживання на технологічні потреби за рахунок термомодернізації, натомість воно зросло.

Підприємству варто звернути увагу на ефективність технологічних витрат електроенергії депо та, можливо, провести енергоаудит.

Таблиця 3.1. Розрахунок показників міста Львів

Місто, назва підприємства:	Львів, ЛКП "Львівелектротранс"									
Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВт, з них:	23415299	23809082	23869294	22494183	23812647	22980932	22701502	24959693	24267614	25997758
натягу (виміряні натягових підстанціях), кВт	21796778	22437178	21978060	19698529	20984559	20375971	20246735	21541209	21257898	22378768
частка, %	93,08776	94,2879	92,07671	87,57166	88,12959	88,66469	89,18676	86,30398	88,00988	86,07961
розрахункове знання	21673518	21464735	20967275	20850947	20288235	20579728	20911898	21546475	20785386	21714560
різниця / цільова функція	3,2Е-05	0,001878	0,002115	0,003428	0,001101	1Е-04	0,001079	5,98Е-08	0,000719	0,000881
питомі витрати середні, кВт/км	3,131373	3,202654	3,156937	2,822873	3,046122	2,775716	2,63775	2,667193	2,654403	2,69532
на електроопалення, кВт	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Технологічні витрати	1618521	1371904	1891234	2795654	2828088	2604961	2454767	3418484	2909716	3618990
частка, %	6,912235	5,762104	7,923293	12,42834	11,87641	11,33531	10,81324	13,69602	11,99012	13,92039
Власні джерела енергії:										
Тип (фотопанелі і т.ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Річний генерація (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Кількість депозитів	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
... з них з електроопаленням	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Трамвайна мережа										
Сумарний річний пробіг трамваїв, ваг-км	3352810	3389412	3307944	3307980	3239874	3660242	3757461	3791985	3560314	3756837
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв, ваг-км	4041969	4033148	4011450	4011494	3927653	4445432	4563506	4605435	4453170	4741846
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв РК, ваг-км	3077790	3065078	2873955	2873986	2633863	2242599	2302164	2323316	2088549	2173011
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕС, ваг-км	873876,4	8774036	822693,2	822702,2	1005287	1864826	1914357	1931945	1736726	1806960
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕР, ваг-км	90302,35	90666,83	314801,8	314805,2	288503,1	338007,5	346985,3	350173,4	627894,6	761876
Довжина трамвайної мережі в однокільній обчисленні, км	70,32	70,32	70,32	78,786	81,86	81,86	81,86	81,86	81,86	81,86
Коефіцієнт використання трамвайної мережі (пробіг за годину)	5,442845	5,421095	5,455339	4,793025	4,518063	5,104897	5,226169	5,288638	4,965529	5,289617
Коефіцієнт використання трамвайної мережі умовний	6,561604	6,547284	6,512061	5,812866	5,477183	6,199992	6,354669	6,423148	6,210785	6,613398
Кількість трамваїв за довжиною	125	124	131	131	140	135	135	135	141	143
14-15 м	4	3	3	3	3	2	2	2	2	2
з реостатною системою керування	4	3	3	3	3	2	2	2	2	2
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18-19 м	119	119	119	119	128	124	124	124	124	124
з реостатною системою керування	92	92	92	92	92	67	67	67	67	67
з електронною системою керування без рекуперації	27	27	27	27	36	57	57	57	57	57
з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19-20 м	1	1	8	8	8	8	8	8	8	8
з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	1	1	8	8	8	8	8	8	8	8
30-32 м	1	1	1	1	1	1	1	1	7	9
з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	1	1	1	1	1	1	1	1	7	9
Умовних вагонів (приведе них до довжини 15 м)	150,6938	149,76	158,86	158,86	189,72	163,96	163,96	163,96	176,35	180,4938
з реостатною системою керування	114,7467	113,8133	113,8133	113,8133	113,8133	82,71333	82,71333	82,71333	82,71333	82,71333
частка, %	76,14581	75,99715	71,6438	71,6438	67,05947	50,44726	50,44726	50,44726	46,90028	45,82625
з електронною системою керування без рекуперації	32,58	32,58	32,58	32,58	43,44	68,78	68,78	68,78	68,78	68,78
частка, %	21,62007	21,75481	20,50862	20,50862	25,5951	41,94926	41,94926	41,94926	38,99977	38,10667
з електронною системою керування та рекуперацією	3,366667	3,366667	12,46667	12,46667	12,46667	12,46667	12,46667	12,46667	24,86667	29
частка, %	2,234118	2,248041	7,847581	7,847581	7,345432	7,603481	7,603481	7,603481	14,09995	16,06708
Тролейбусна мережа										
Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш-км	2832107	2856841	2841107	2863201	2857989	2802960	3036956	3386949	3531627	3500107
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів, маш-км	2918804	2972659	2950380	2966690	2961290	2895365	3112252	3470923	3593047	3560780
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів РК, маш-км	780274,4	501877,5	473517,8	448453,2	447636,8	154008,8	125494	139956,6	122839,2	121742,9
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕС, маш-км	1705044	1891692	1784798	1690323	1687247	1386079	1129446	1259609	1197682	1186993
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕР, маш-км	433485,8	579089,4	692064,5	827913,5	826406,5	1355277	1857312	2071357	2272525	2252243
Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км	126,169	126,169	119,03	120,535	130,1082	130,62	135,197	135,286	135,286	136,184
Коефіцієнт використання тролейбусної мережі (пробіг за годину)	2,562435	2,584814	2,717308	2,711656	2,507563	2,449645	2,557285	2,857931	2,980011	2,933339
Коефіцієнт використання тролейбусної мережі умовний	2,640877	2,689604	2,829551	2,809667	2,598197	2,530402	2,627869	2,928788	3,031837	2,984964
Кількість тролейбусів за типом	98	74	78	83	83	91	121	121	115	115
Одинарні	92	68	72	77	77	85	115	115	111	111
з реостатною системою керування	27	13	13	13	13	5	5	5	4	4
з електронною системою керування без рекуперації	50	40	40	40	40	35	35	35	33	33
з електронною системою керування та рекуперацією	15	15	19	24	24	44	74	74	74	74
Зчле новані	6	6	6	6	6	6	6	6	4	4
з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування без рекуперації	6	6	6	6	6	6	6	6	4	4
з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Умовних тролейбусів (приведе них до одинарною)	101	77	81	86	86	94	124	124	117	117
з реостатною системою керування	27	13	13	13	13	5	5	5	4	4
частка, %	26,73267	16,88312	16,04938	15,11628	15,11628	5,319149	4,032258	4,032258	3,418803	3,418803
з електронною системою керування без рекуперації	59	49	49	49	49	45	45	45	39	39
частка, %	58,41584	63,63636	60,49383	56,97674	56,97674	47,87234	36,29032	36,29032	33,33333	33,33333
з електронною системою керування та рекуперацією	15	15	19	24	24	44	74	74	74	74
частка, %	14,85149	19,48052	23,45679	27,90698	27,90698	46,80851	59,67742	59,67742	63,24786	63,24786

Додаток І. Миколаїв

На кривих пробігу та витрат електроенергії Миколаєва (рис. І.1) спостерігаються суттєві коливання обсягів руху по роках. Обсяги руху трамваїв поступово зростали до 2019 року, після чого стабілізувалися. Обсяги руху тролейбусів різко зросли у 2015-2016 роках, а потім також стабілізувалися. З початком повномасштабного вторгнення РФ обсяги руху обох видів електротранспорту в місті, яке значно постраждало та втратило велику кількість населення, істотно впали. Крива витрат електроенергії не має аномальних коливань.

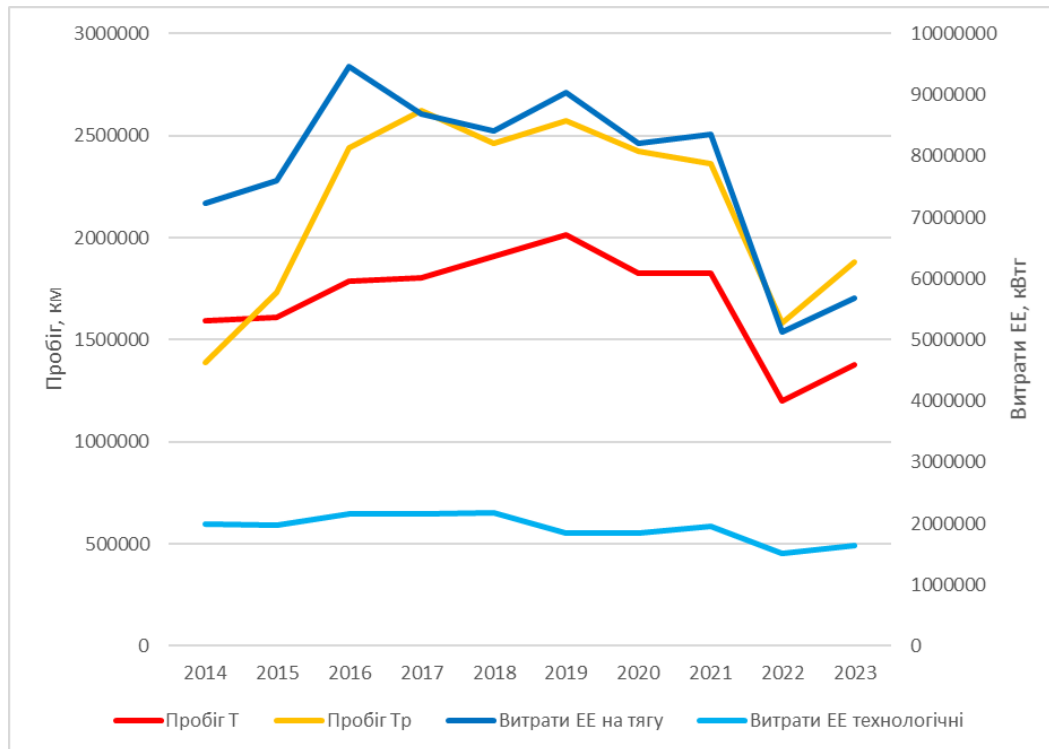


Рисунок І.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Миколаїв.

Розрахункові значення питомих витрат на 1 км пробігу умовних трамваїв та тролейбусів:

- трамваї з реостатними системами керування – 3,5 кВт·год/км;
- трамваї з електронними системами керування без рекуперації – 1,6 кВт·год/км;
- трамваї з електронними системами керування з рекуперацією – 1,31 кВт·год/км;
- тролейбуси з реостатними системами керування – 2,22 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування без рекуперації – 1,44 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 1,23 кВт·год/км.

Витрати електроенергії підприємством на технологічні потреби за період спостереження не мають значних коливань і не корелюють з обсягами руху. За 10 років витрати на технологічні потреби, включно з електроопаленням депо, зменшилися на 18,3%. Найбільше падіння відбулося під час повномасштабного вторгнення.

Таблиця І.1. Розрахунок показників міста Миколаїв

Місто, назва підприємства: Миколаїв, КП ММР "Миколаївелектротранс"											
№	Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:	9233730	9579197	11627967	10848242	10581998	10883403	10041483	10304899	6632137	7305283
1а	натягу (виміряні на тягових підстанціях), кВтг	7234536	7603723	9464605	8693659	8412193	9045637	8199224	8353399	5118596	5671353
	частка %	78,34901	79,37746	81,39519	80,13887	79,49532	83,11405	81,65352	81,08181	77,17868	77,63358
	розрахункове значення	7454278	7187299	8637416	8968767	8990784	9446949	8716912	8208633	5301712	6156050
	різниця / цільова функція	0,000851	0,008996	0,058346	0,001003	0,022379	0,003874	0,015892	9,52E-05	0,001638	0,05335
	питомі витрати середні, кВтг/км	2,407225	2,281271	2,244347	1,970143	1,929435	1,977258	1,933431	2,000867	1,845338	1,743545
1б	на електроопалення депо, кВтг	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Технологічні витрати	1999194	1975474	2163361	2154583	2169805	1837766	1842259	1949500	1515441	1633930
	частка %	21,65099	20,62254	18,60481	19,86113	20,50468	16,88595	18,34648	18,91819	22,82132	22,36642
3	Власні джерела енергії:										
3а	Тип (фотопанелі і т.ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3б	Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3в	Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Кількість депо	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4а	...з них з електроопаленням	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	Трамвайна мережа										
5а	Сумарний річний пробіг трамваїв, ваг-км	1593200	1607700	1787500	1802900	1907800	2014600	1828000	1823300	1198500	1378800
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв, ваг-км	1614443	1602888	1777686	1792405	1897326	2003539	1817964	1813290	1190999	1370171
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв РК, ваг-км	1241879	997430,2	1065490	1074312	1137198	1200860	1089631	1086830	693988,6	798390,9
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕС, ваг-км	124187,9	99743,02	106549	107431,2	113719,8	120086	108963,1	108683	74355,92	85541,88
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕР, ваг-км	248375,8	505714,6	605647,1	610661,6	646407,5	682593,9	619369,4	617776,9	422654,7	486238
5б	Довжина трамвайної мережі в однокільному обчисленні, км	69,631	69,631	69,631	69,631	69,631	69,631	69,631	69,631	69,631	67,588
	Коефіцієнт використання трамвайної мережі (пробіг за годину)	2,611942	2,635714	2,922477	2,954747	3,127707	3,302799	2,988692	2,989175	1,964859	2,328775
	Коефіцієнт використання трамвайної мережі умовний	2,646768	2,627825	2,914395	2,938525	3,110536	3,284666	2,980427	2,972764	1,952562	2,314201
6	Кількість трамваїв за довжиною	39	49	51	51	51	51	51	51	49	49
6а	14-15 м	0	10	12	12	12	12	12	12	12	12
	з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	10	12	12	12	12	12	12	12	12
6б	15-16 м	39	39	39	39	39	39	39	39	37	37
	з реостатною системою керування	30	30	30	30	30	30	30	30	28	28
	з електронною системою керування без рекуперації	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	з електронною системою керування та рекуперацією	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
6в	Умовних вагонів (приєднані до довжини 15 м)	39,52	48,85333	50,72	50,72	50,72	50,72	50,72	50,72	48,69333	48,69333
	з реостатною системою керування	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	28,37333	28,37333
	частка %	76,92308	62,22707	59,93691	59,93691	59,93691	59,93691	59,93691	59,93691	58,26944	58,26944
	з електронною системою керування без рекуперації	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04
	частка %	7,692308	6,222707	5,993691	5,993691	5,993691	5,993691	5,993691	5,993691	6,243154	6,243154
	з електронною системою керування та рекуперацією	6,08	15,41333	17,28	17,28	17,28	17,28	17,28	17,28	17,28	17,28
	частка %	15,38462	31,55022	34,0694	34,0694	34,0694	34,0694	34,0694	34,0694	35,4874	35,4874
7	Тролейбусна мережа										
7а	Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш-км	1390900	1730220	2439400	2620300	2462600	2571300	2422800	2362600	1582800	1882600
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів, маш-км	1390900	1730220	2439400	2620300	2462600	2571300	2422800	2362600	1582800	1882600
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів РК, маш-км	880903,3	587038,9	679832,8	730247,5	686298,4	716591,8	675206,6	393766,7	173118,8	193797,1
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕС, маш-км	0	803316,4	1319675	1417539	1332226	1391031	1310695	608548,5	395700	387594,1
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕР, маш-км	509996,7	339864,6	439891,8	472513,1	444075,4	463677	436898,4	1360285	1013981	1301209
7б	Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км	115,894	115,894	115,894	115,894	115,894	115,894	122,494	122,494	122,494	122,494
	Коефіцієнт використання тролейбусної мережі (пробіг за годину)	1,370032	1,704262	2,396237	2,580988	2,425654	2,532723	2,251899	2,201767	1,475051	1,754442
	Коефіцієнт використання тролейбусної мережі умовний	1,370032	1,704262	2,402802	2,580988	2,425654	2,532723	2,257868	2,201767	1,475051	1,754442
8	Кількість тролейбусів за типом	30	56	61	61	61	61	61	66	64	68
8а	Однинарі	30	56	61	61	61	61	61	66	64	68
	з реостатною системою керування	19	19	17	17	17	17	17	11	7	7
	з електронною системою керування без рекуперації	0	26	33	33	33	33	33	17	16	14
	з електронною системою керування та рекуперацією	11	11	11	11	11	11	11	38	41	47
8б	Умовних тролейбусів (приєднані до одинарного)	30	56	61	61	61	61	61	66	64	68
	з реостатною системою керування	19	19	17	17	17	17	17	11	7	7
	частка %	63,33333	33,92857	27,86885	27,86885	27,86885	27,86885	27,86885	16,66667	10,9375	10,29412
	з електронною системою керування без рекуперації	0	26	33	33	33	33	33	17	16	14
	частка %	0	46,42857	54,09836	54,09836	54,09836	54,09836	54,09836	25,75758	25	20,58824
	з електронною системою керування та рекуперацією	11	11	11	11	11	11	11	38	41	47
	частка %	36,66667	19,64286	18,03279	18,03279	18,03279	18,03279	18,03279	57,57576	64,0625	69,11765

Додаток К. Одеса

На кривих пробігу та витрат електроенергії по Одесі (рис. К.1) обсяги руху до 2019 року були відносно стабільними. У 2019 році відбувся помітний приріст, і далі до 2022 року вони також коливалися близько значень 2019 року. З початком повномасштабного вторгнення РФ обсяги руху значно впали.

При цьому крива витрат електроенергії демонструє постійну тенденцію до зниження витрат. Навіть у 2019 році, при збільшенні обсягів руху, не було приросту витрат електроенергії на тягу. Це пов'язано з поступовим заміщенням енергоємного рухомого складу шляхом придбання нового, вживаного та модернізації власного.

Примітка: Надані підприємством дані щодо витрат електроенергії на тягу у 2015 році значно вищі порівняно з іншими роками. Порівняльний аналіз даних за всі роки показав, що це, ймовірно, помилка, і замість значення 39 971 600 кВт·год мало бути 29 971 600 кВт·год (неправильна перша цифра). У такому разі витрати на тягу відповідають іншим рокам. Тому в розрахунковій таблиці це значення було скориговано для релевантного відображення на кривих витрат-пробігу. Однак, щоб уникнути похибки, 2015 рік не входив у розрахунок питомих витрат.

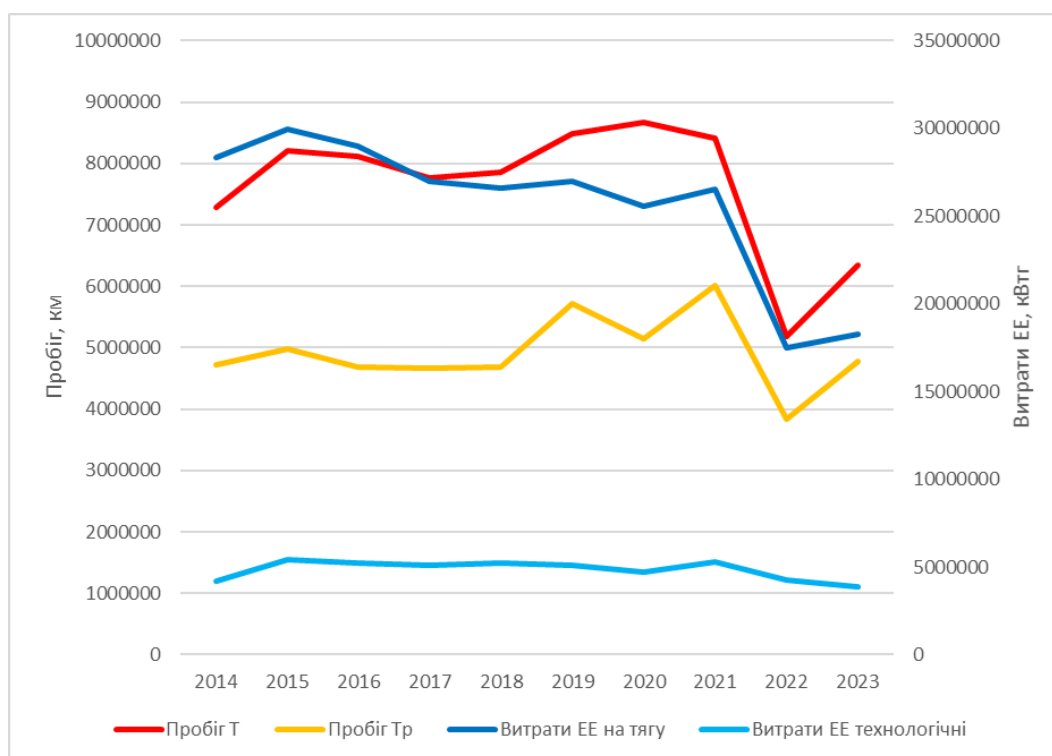


Рисунок К.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Одеса.

Розрахункові значення питомих витрат на 1 км пробігу умовних трамваїв та тролейбусів:

- трамваї з реостатними системами керування – 2,75 кВт·год/км;
- трамваї з електронними системами керування без рекуперації – 2,20 кВт·год/км;
- трамваї з електронними системами керування з рекуперацією – 1,57 кВт·год/км;
- тролейбуси з реостатними системами керування – 2,76 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування без рекуперації – 2,01 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 1,09 кВт·год/км.

Таблиця К.1. Розрахунок показників міста Одеса

Місто, назва підприємства: Одеса, КП "Одесміське електротранс", трамвай										
Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:	32584400	35411400	34189600	32070300	31851300	32027200	30281000	31765200	21713200	22143200
натягу (виміряні натягових підстанцій), кВтг	28371900	29971600	28994000	26971500	26624400	26955800	25570400	26516700	17461200	18270800
частка %	87,07203	84,63828	84,80357	84,10118	83,58968	84,16533	84,44371	83,4483	80,41744	82,51201
розрахункове значення	28057433	30070109	28856131	27607705	26372334	27083492	25460352	27241642	16958239	20060497
різниця / цільова функція	0,000123	1,08E-05	2,26E-05	0,000556	8,96E-05	2,24E-05	1,85E-05	0,000747	0,00083	0,009595
питомі витрати середні, кВтг/км	2,410645	2,327334	2,327628	2,229905	2,18411	1,956408	1,918516	1,898945	2,002445	1,679086
на електроопалення, кВтг	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
частка %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Технологічні витрати	4212500	5439800	5195600	5098800	5226900	5071400	4710600	5295500	4252000	3872400
частка %	12,92797	15,36172	15,19643	15,89882	16,41032	15,83467	15,55629	16,55177	19,58256	17,48789
Власні джерела енергії:										
Тип (фотопанелі і т. ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Кількість депо	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
...з них з електроопаленням	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Трамвайна мережа										
Сумарний річний пробіг трамваїв, ваг-км	7286396	8208202	8112768	7763742	7861735	8480738	8660904	8418183	5191068	6342732
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв, ваг-км	6835897	7698791	7609280	7284978	7381343	7962521	8131678	7903789	4873867	6106116
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв РК, ваг-км	4487729	4552181	4499255	4250151	3296043	3801592	3371732	3277239	2020908	2361655
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕС, ваг-км	3772652	4044621	3997596	7614439	8576439	9251714	9448259	9183472	5662983	6882539
Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕР, ваг-км	2310441	3106163	3070049	2958683	3999535	4668412	4665464	4534715	2796329	3675636
Довжина трамвайної мережі в однокільному обчисленні, км	197,4	197,4	197,4	197,4	197,4	197,4	197,4	197,4	197,4	197,4
Коефіцієнт використання трамвайної мережі (пробіг за годину)	4,213579	4,746754	4,678747	4,489726	4,546395	4,904361	4,994865	4,868185	3,001964	3,667964
Коефіцієнт використання трамвайної мережі умовний	3,953159	4,452165	4,400402	4,21286	4,268587	4,604679	4,702501	4,570714	2,818528	3,531131
Кількість трамваїв за довжиною	197	207	207	208	187	187	187	187	187	188
14-15 м	186	196	196	196	175	175	175	175	175	172
з реостатною системою керування	130	123	123	122	84	78	78	78	78	75
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	56	73	73	74	91	97	97	97	97	97
15-16 м	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12
з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування без рекуперації	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
з електронною системою керування та рекуперацією	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
30-31 м	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Умовних вагонів (приєднані до довжини 15 м)	184,82	194,1533	194,1538	195,1733	175,5733	175,5738	175,5733	175,5738	175,5738	180,9867
з реостатною системою керування	121,3833	114,8	114,8	113,8667	78,4	72,8	72,8	72,8	72,8	70
частка %	65,54946	59,12852	59,12852	58,3413	44,65371	41,46416	41,46416	41,46416	41,46416	38,67688
з електронною системою керування без рекуперації	1,02	1,02	1,02	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04
частка %	0,551888	0,525358	0,525358	1,045225	1,161908	1,161908	1,161908	1,161908	1,161908	1,127155
з електронною системою керування та рекуперацією	62,46667	78,33333	78,33333	79,26667	95,13333	100,7333	100,7333	100,7333	100,7333	108,9467
частка %	33,79865	40,34612	40,34612	40,61347	54,18439	57,37394	57,37394	57,37394	57,37394	60,19596
Тролейбусна мережа										
Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш-км	4723244	4973492	4676832	4663622	4680713	5722188	5137711	6019992	3833208	4775282
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів, маш-км	4933526	5179292	4847180	4810380	4808701	5815688	5196539	6060126	3846071	4775282
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів РК, маш-км	3833592	4013093	3639257	3375419	3199706	2412295	1627595	2407997	1504984	1298877
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕС, маш-км	2588079	2743996	2477792	260902	2925446	2991994	3137533	3210663	2058098	305618
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕР, маш-км	841125,7	891798,5	960144,3	1174059	1316451	3104194	325191	3831062	2135277	3170787
Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км	150,5	150,5	150,5	150,5	150,5	150,5	150,5	150,5	150,5	150,5
Коефіцієнт використання тролейбусної мережі (пробіг за годину)	3,582612	3,772427	3,537716	3,537389	3,550352	4,340318	3,88634	4,566204	2,907514	3,622083
Коефіцієнт використання тролейбусної мережі умовний	3,742112	3,928527	3,676618	3,648705	3,647432	4,411238	3,94161	4,596646	2,91727	3,622083
Кількість тролейбусів за типом	146	145	151	143	128	153	131	150	149	125
Однорядні	133	133	140	134	121	148	128	148	148	125
з реостатною системою керування	99	99	101	90	77	57	37	57	57	34
з електронною системою керування без рекуперації	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
з електронною системою керування та рекуперацією	26	26	31	36	36	83	83	83	83	83
Зчленовані	13	12	11	9	7	5	3	2	1	0
з реостатною системою керування	13	12	11	9	7	5	3	2	1	0
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Умовних тролейбусів (приєднані до однорядного)	152,5	151	156,5	147,5	131,5	155,5	132,5	151	149,5	125
з реостатною системою керування	118,5	117	117,5	103,5	87,5	64,5	41,5	60	58,5	34
частка %	77,70492	77,48344	75,07987	70,16949	66,53992	41,4791	31,32075	39,7351	39,13043	27,2
з електронною системою керування без рекуперації	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
частка %	5,245902	5,298013	5,111821	5,423729	6,08365	5,144695	6,037736	5,298013	5,351171	6,4
з електронною системою керування та рекуперацією	26	26	31	36	36	83	83	83	83	83
частка %	17,04918	17,21854	19,80831	24,40678	27,37643	53,37621	62,64151	54,96689	55,53839	66,4

Додаток Л. Полтава

На кривих пробігу та витрат електроенергії Полтави (рис. Л.1) помітні коливання обсягів руху в період надходження великої партії нових тролейбусів та під час повномасштабного вторгнення РФ. При цьому останній і перший рік досліджуваного періоду є співставними. Водночас, витрати електроенергії на тягу демонструють стабільну тенденцію до зниження.

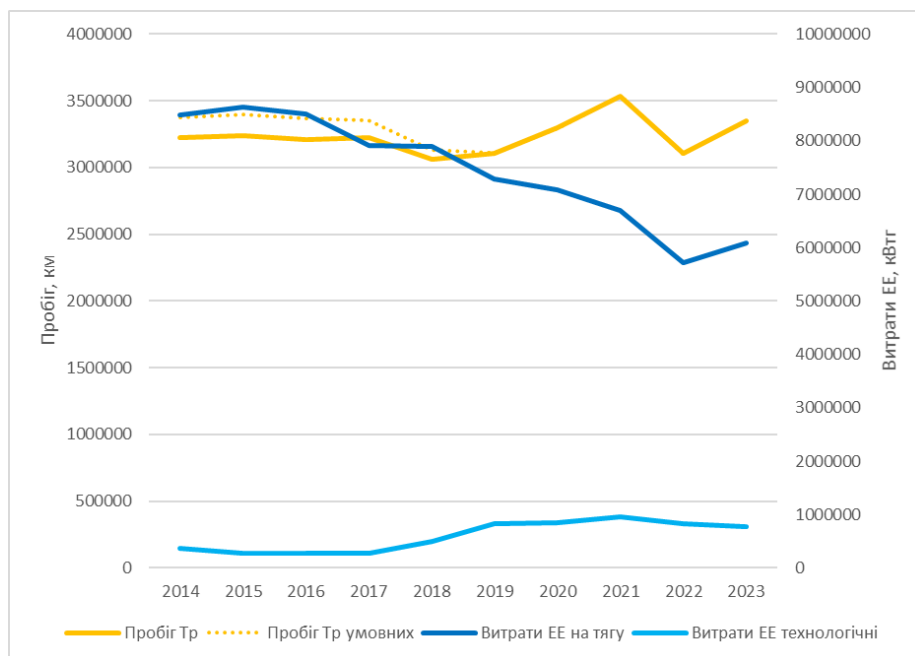
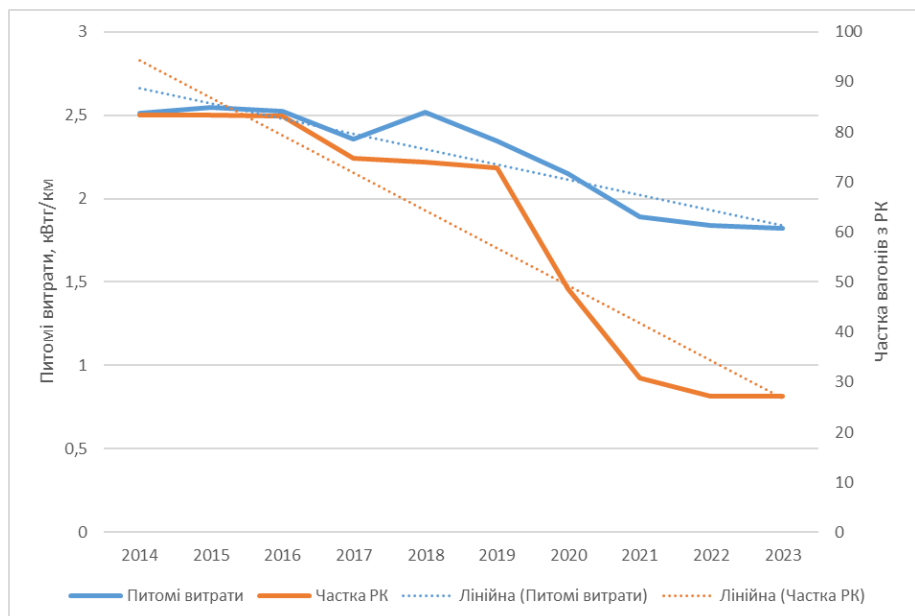


Рисунок Л.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Полтава.

Розрахункові значення питомих

витрат на 1 км пробігу умовних тролейбусів:

- тролейбуси з реостатними системами керування – 2,73 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 1,51 кВт·год/км.



За 10 років частка рухомого складу в умовних одиницях з реостатними системами керування, які майже відповідають фактичним через мінімальну кількість зчленованих тролейбусів, зменшилася на 56,1%. Це забезпечило зниження середніх питомих витрат на тягу на 27,5% (рис. Л.2).

Рисунок Л.2. Криві питомих витрат на тягу та частки рухомого складу з РК системами міста Полтава.

Витрати електроенергії підприємством на технологічні потреби мали суттєвий приріст

протягом 2018-2019 років, який за підсумками всього періоду дослідження склав 106,5%. Причини цього зростання неочевидні, адже єдине депо вже мало електроопалення, витрати на яке надані й майже не змінювалися по роках. Крім того, закупівля нового рухомого складу, вочевидь, не повинна була збільшити потребу в ремонтах та пов'язані з цим витрати електроенергії. Можливо, для зростання технологічних витрат є приховані об'єктивні причини, внутрішні зміни у структурі підприємства, встановлення нетипового

енергоємного обладнання тощо. Проте, підприємству доцільно перевірити енергоефективність роботи депо та інших нетягових споживачів.

Таблиця Л.1. Розрахунок показників міста Полтава

Місто, назва підприємства: Полтава, КП "Полтаваелектроавтотранс"											
№	Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:	8919000	8959200	8821200	8243900	8431100	8157900	7980800	7709900	6601000	6922400
1а	натягу (виміряні натягових підстанціях), кВтг	8489700	8637300	8498200	7905900	7887600	7280400	7077400	6692900	5714000	6093900
	частка, %	95,1867	96,407	96,3384	95,9	93,5536	89,2436	88,6803	86,8092	86,5626	88,0316
	розрахункове значення	8535206	8576576	8497810	8122811	7563551	7453085	6928790	6667055	5719922	6165744
	різниця / цільова функція	2,9E-05	4,9E-05	2,1E-09	0,00075	0,00169	0,00056	0,00044	1,5E-05	1,1E-06	0,00014
	питомі витрати середні, кВтг/км	2,51307	2,54443	2,52353	2,35772	2,51576	2,34337	2,14728	1,89334	1,84028	1,82072
1б	на електроопалення депо, кВтг	54085	53975	54010	54920	53870	53945	53825	54035	52710	53800
	частка, %	0,63707	0,62491	0,63555	0,69467	0,68297	0,74096	0,76052	0,80735	0,92247	0,88285
	Технологічні витрати	375215	267925	268990	283080	489630	823555	849575	962965	834290	774700
	частка, %	4,20692	2,9905	3,04936	3,43381	5,80743	10,0952	10,6452	12,49	12,6388	11,1912
3	Власні джерела енергії:										
3а	Тип (фотопанелі і т.ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3б	Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3в	Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Кількість депо	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4а	...з них з електроопаленням	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	Тролейбусна мережа										
7а	Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш-км	3224661	3240291	3212160	3221177	3058800	3106810	3295985	3534963	3104958	3346964
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів, маш-км	3378216	3394591	3367587	3353192	3135270	3106810	3295985	3534963	3104958	3346964
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів в РК, маш-км	2815180	2828825	2797688	2508294	2319590	2264285	1600907	1091038	846807	912808
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів в ЕС, маш-км	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів в ЕР, маш-км	563036	565765	569899	844899	815680	842525	1695078	2443925	2258151	2434156
7б	Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км	73,05	73,05	73,05	73,05	73,05	73,05	73,05	73,05	73,05	73,05
	Коефіцієнт використання тролейбусної мережі (пріждів за годину)	5,03918	5,0636	5,00593	5,03373	4,77999	4,85501	5,13656	5,52409	4,85212	5,2303
	Коефіцієнт використання тролейбусної мережі умовний	5,27914	5,30473	5,26253	5,24003	4,89949	4,85501	5,15064	5,52409	4,85212	5,2303
8	Кількість тролейбусів за типом	63	63	62	61	60	59	70	81	77	77
8а	Одинарні	57	57	56	56	57	59	70	81	77	77
	з реостатною системою керування	46	46	45	40	41	43	34	25	21	21
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	11	11	11	16	16	16	36	56	56	56
8б	Зчленовані	6	6	6	5	3	0	0	0	0	0
	з реостатною системою керування	6	6	6	5	3	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8г	Умовних тролейбусів (приведених до одинарного)	66	66	65	63,5	61,5	59	70	81	77	77
	з реостатною системою керування	55	55	54	47,5	45,5	43	34	25	21	21
	частка, %	83,3333	83,3333	83,0769	74,8031	73,9837	72,8814	48,5714	30,8642	27,2727	27,2727
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	11	11	11	16	16	16	36	56	56	56
	частка, %	16,6667	16,6667	16,9231	25,1969	26,0163	27,1186	51,4286	69,1358	72,7273	72,7273

Додаток М. Рівне

На кривих пробігу та витрат електроенергії Рівного (рис. М.1) наявні невеликі коливання обсягів руху, яким відповідають коливання витрат електроенергії на тягу. З 2019 року спостерігається тенденція до падіння обсягів руху. Найбільш суттєве зниження відбулося у 2020 році під час пандемії COVID-19. При цьому зниження витрат електроенергії було непропорційно більшим, що пояснюється зменшенням завантаженості рухомого складу в умовах запроваджених обмежень.

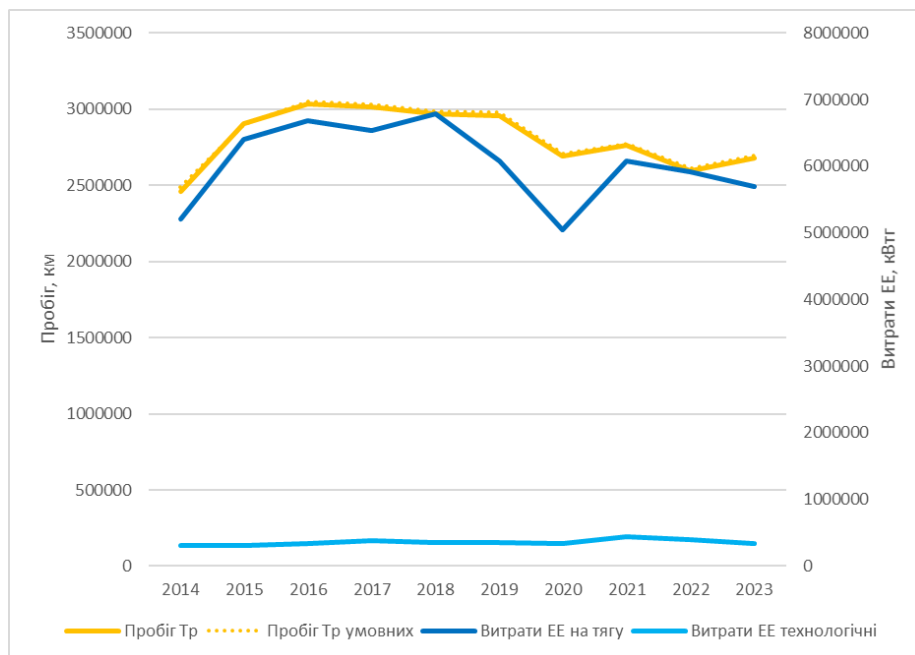
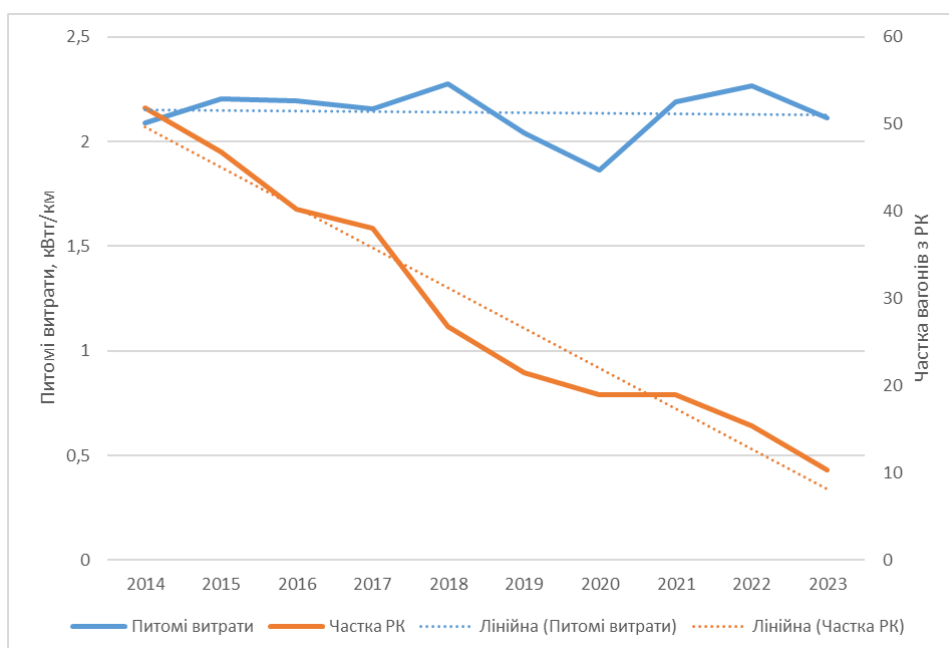


Рисунок М.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Рівне.

Розрахункові значення питомих

витрат на 1 км пробігу умовних тролейбусів:

- тролейбуси з реостатними системами керування – 2,17 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування без рекуперації – 2,17 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 1,86 кВт·год/км.



Питомі витрати перебувають на середньому рівні. За 10 років частка рухомого складу в умовних одиницях з реостатними системами керування скоротилася на 41,5%. При цьому середні питомі витрати на тягу майже не змінилися і навіть збільшилися на 1% (рис. М.2).

Рисунок М.2. Криві питомих витрат на тягу та частки рухомого складу з РК системами міста Рівне.

Така тенденція відповідає загальноукраїнській і потребує додаткової уваги підприємства до стану енергоспоживання.

та режиму роботи систем керування нового рухомого складу.

Витрати електроенергії підприємством на технологічні потреби за період спостереження мають незначні коливання: до 2022 року спостерігалася тенденція до зростання, а з 2022 року вони знову почали знижуватися. Відносна частка цих витрат є однією з найнижчих в Україні, становлячи 5-6% від загальних. Кореляція з обсягами руху не простежується.

Таблиця М.1. Розрахунок показників міста Рівне

Місто, назва підприємства: Рівне, КП РМР "Рівнеелектроавтотранс"											
№	Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:	5515959	6714424	7026275	6919598	7139289	6428834	5376657	6518632	6318663	6030580
1а	натягу (виміряні натягових підстанціях), кВтг	5205494	6401407	6685197	6535520	6787958	6075090	5038989	6074760	5916948	5688335
	частка, %	94,3715	95,3381	95,1457	94,4494	95,0789	94,4975	93,7197	93,1907	93,6424	94,3248
	розрахункове значення	5393940	6290647	6591348	6527591	6323940	6276212	5680280	5826443	5469117	5624364
	різниця / цільова функція	0,00131	0,0003	0,0002	1,5E-06	0,00467	0,0011	0,0162	0,00167	0,00573	0,00013
	питомі витрати середні, кВтг/км	2,09053	2,20414	2,19216	2,15463	2,2742	2,04128	1,86218	2,18863	2,26652	2,11195
1б	на електроопалення депо, кВтг	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Технологічні витрати	310465	313017	341078	384078	351331	353744	337668	443872	401715	342245
	частка, %	5,62849	4,66186	4,85432	5,55058	4,92109	5,50246	6,28026	6,80928	6,35759	5,67516
3	Власні джерела енергії:										
3а	Тип (фотопанелі і т. ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3б	Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3в	Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Кількість депо	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4а	...з них з електроопаленням	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Тролейбусна мережа										
7а	Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш-км	2459300	2904260	3032560	3017190	2968800	2959310	2690850	2760090	2595140	2676030
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів, маш-км	2490041	2904260	3049597	3033239	2984761	2976124	2705967	2775596	2610587	2693407
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів РК, маш-км	1291133	1357836	1226653	1155520	798065	638942	513983	527208	401629	278029
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕС, маш-км	1168168	1508706	1737759	1701182	1691897	1748683	1572182	1612637	1575621	1702928
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕР, маш-км	30741,3	37717,7	85184,3	176538	494800	588499	619803	635751	633338	712450
7б	Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км	121,6	121,6	121,6	121,6	121,6	121,6	121,6	121,6	121,6	121,6
	Коефіцієнт використання тролейбусної мережі (проездів за годину)	2,30873	2,72645	2,83912	2,83247	2,78704	2,77813	2,51921	2,59111	2,43626	2,51219
	Коефіцієнт використання тролейбусної мережі умовний	2,33759	2,72645	2,86289	2,84753	2,80202	2,79392	2,5403	2,60567	2,45076	2,52851
8	Кількість тролейбусів за типом	80	77	89	94	93	88	89	89	84	77
8а	Одинарні	78	77	88	93	92	87	88	88	83	76
	з реостатною системою керування	39	36	36	36	25	19	17	17	13	8
	з електронною системою керування без рекуперації	38	40	51	53	53	52	52	52	51	49
	з електронною системою керування та рекуперацією	1	1	1	4	14	16	19	19	19	19
8б	Зчленовані	2	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	з реостатною системою керування	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
8г	Умовних тролейбусів (приведених до одинарного)	81	77	89,5	94,5	93,5	88,5	89,5	89,5	84,5	77,5
	з реостатною системою керування	42	36	36	36	25	19	17	17	13	8
	частка, %	51,8519	46,7532	40,2235	38,0952	26,738	21,4689	18,9944	18,9944	15,3846	10,3226
	з електронною системою керування без рекуперації	38	40	51	53	53	52	52	52	51	49
	частка, %	46,9136	51,9481	56,9832	56,0847	56,6845	58,7571	58,1006	58,1006	60,355	63,2258
	з електронною системою керування та рекуперацією	1	1	2,5	5,5	15,5	17,5	20,5	20,5	20,5	20,5
	частка, %	1,23457	1,2987	2,7933	5,82011	16,5775	19,774	22,905	22,905	24,2604	26,4516

Додаток Н. Суми

На кривих пробігу та витрат електроенергії Сум (рис. Н.1) наявні коливання обсягів руху та відповідні їм коливання витрат електроенергії на тягу. Під час повномасштабного вторгнення РФ обсяги руху скоротилися найбільш суттєво.

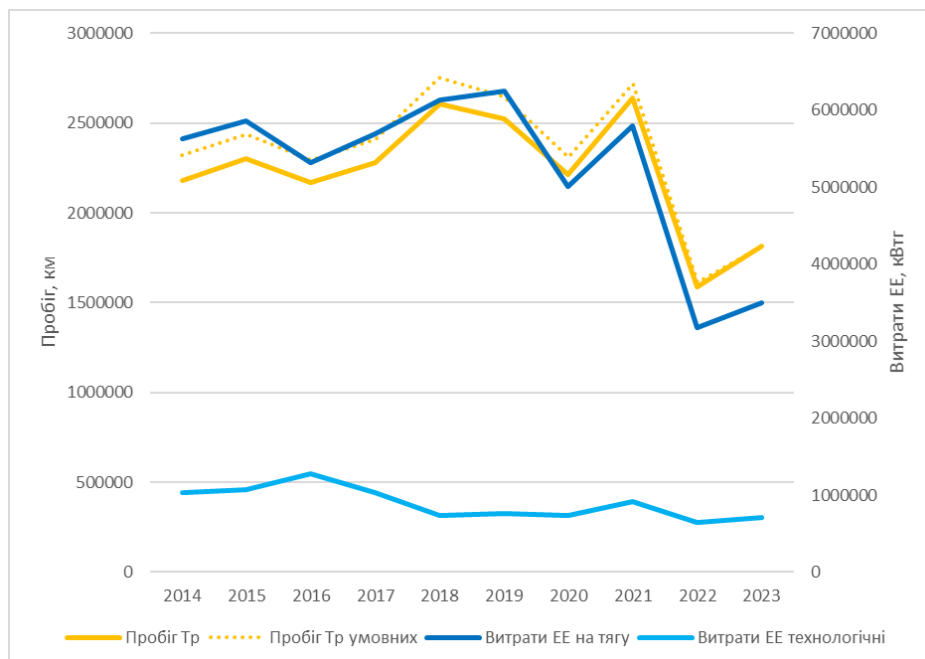
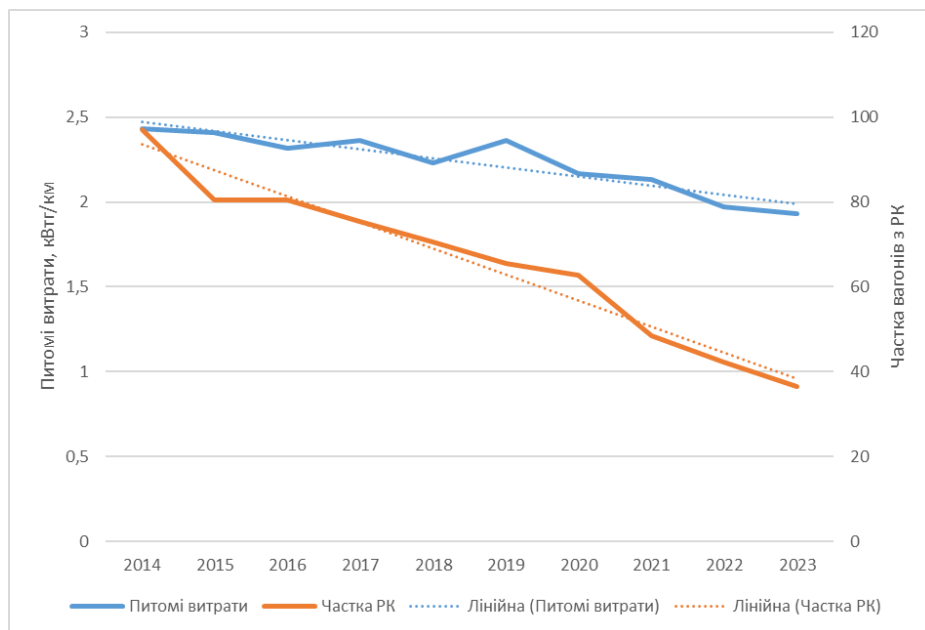


Рисунок Н.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Суми.

Розрахункові значення питомих витрат на 1 км пробігу умовних тролейбусів:

- тролейбуси з реостатними системами керування – 2,53 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 1,64 кВт·год/км.



Питомі витрати перебувають на середньому рівні. За 10 років частка рухомого складу в умовних одиницях з реостатними системами керування скоротилася на 60,4%. Це забезпечило зниження середніх питомих витрат на тягу на 20,6% (рис. Н.2).

Рисунок Н.2. Криві питомих витрат на тягу та частки рухомого складу з РК системами міста Суми.

Витрати електроенергії на технологічні потреби, розраховані за вирахуванням витрат на опалення в окремі роки, мають від'ємні значення, що суперечить їхній сутності й свідчить про розрахункове значення наданих підприємством витрат на опалення. Тому для розрахунку дані витрат на опалення та інші технологічні потреби були об'єднані. Таким чином, витрати на технологічні потреби та опалення мають тенденцію до поступового зниження протягом досліджуваного періоду, яке загалом склало 31,7%.

Таблиця Н.1. Розрахунок показників міста Суми

Місто, назва підприємства: Суми, КП СМР "Електроавтотранс"											
№	Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:	6664995	6934340	6593912	6726620	6873676	7006965	5749083	6720925	3818739	4203178
1а	натягу (виміряні натягових підстанціях), кВтг	5632303	5868009	5316698	5691693	6138734	6246471	5013408	5802622	3171103	3497987
	частка, %	84,5057	84,6225	80,6304	84,6145	89,3079	89,1466	87,2036	86,3367	83,0406	83,2224
	розрахункове значення	5804225	5744723	5410913	5572572	6249866	5881483	5083227	5631804	3246184	3561099
	різниця / цільова функція	0,00093	0,00044	0,00031	0,00044	0,00033	0,00341	0,00019	0,00087	0,00056	0,00033
	питомі витрати середні, кВтг/км	2,42906	2,40729	2,31568	2,35957	2,22812	2,36085	2,16855	2,13408	1,96874	1,92977
1б	на електроопалення депо, кВтг	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Технологічні витрати	1032692	1066331	1277214	1034927	734942	760495	735675	918303	647636	705192
	частка, %	15,4943	15,3775	19,3696	15,3855	10,6921	10,8534	12,7964	13,6633	16,9594	16,7776
3	Власні джерела енергії:										
3а	Тип (фотопанелі і т. ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3б	Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3в	Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Кількість депо	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4а	...з них з електроопаленням	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	Тролейбусна мережа										
7а	Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш-км	2178185	2302177	2168404	2280000	2608180	2523200	2212786	2641343	1590078	1812646
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів, маш-км	2318713	2437599	2295957	2412174	2755120	2645856	2311866	2719030	1610728	1812646
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів РК, маш-км	2248449	1963622	1849521	1817391	1946951	1734700	1453173	1320672	681462	663786
	Сумарний річний пробіг тролейбусів ЕС, маш-км	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕР, маш-км	70264	473978	446436	594783	808168	911156	858693	1398358	929266	1148860
7б	Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км	95,786	95,786	95,786	103,138	103,138	103,138	103,138	103,138	103,138	103,138
	Коефіцієнт використання тролейбусної мережі (пробігів за годину)	2,5959	2,74367	2,57719	2,52355	2,88679	2,79273	2,44247	2,92349	1,75993	2,00627
	Коефіцієнт використання тролейбусної мережі умовний	2,76338	2,90507	2,73626	2,66984	3,04942	2,92849	2,55882	3,00948	1,78279	2,00627
8	Кількість тролейбусів за типом	62	68	68	69	71	72	67	85	77	71
8а	Одинарні	54	60	60	61	63	65	61	80	75	71
	з реостатною системою керування	52	46	46	43	41	39	35	35	30	26
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	2	14	14	18	22	26	26	45	45	45
8б	Зчленовані	8	8	8	8	8	7	6	5	2	0
	з реостатною системою керування	8	8	8	8	8	7	6	5	2	0
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8г	Умовних тролейбусів (приведених до одинарного)	66	72	72	73	75	75,5	70	87,5	78	71
	з реостатною системою керування	64	58	58	55	53	49,5	44	42,5	33	26
	частка, %	96,9697	80,5556	80,5556	75,3425	70,6667	65,5629	62,8571	48,5714	42,3077	36,6197
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	2	14	14	18	22	26	26	45	45	45
	частка, %	3,0303	19,4444	19,4444	24,6575	29,3333	34,4371	37,1429	51,4286	57,6923	63,3803

Додаток О. Хмельницький

На кривих пробігу та витрат електроенергії Хмельницького (рис. О.1) видно досить стабільні обсяги руху з незначною тенденцією до падіння до 2022 року, а також суттєве падіння у 2022 році. Падіння витрат електроенергії на тягу є випереджаючим за рахунок поступової заміни енергоємного рухомого складу в структурі парку.

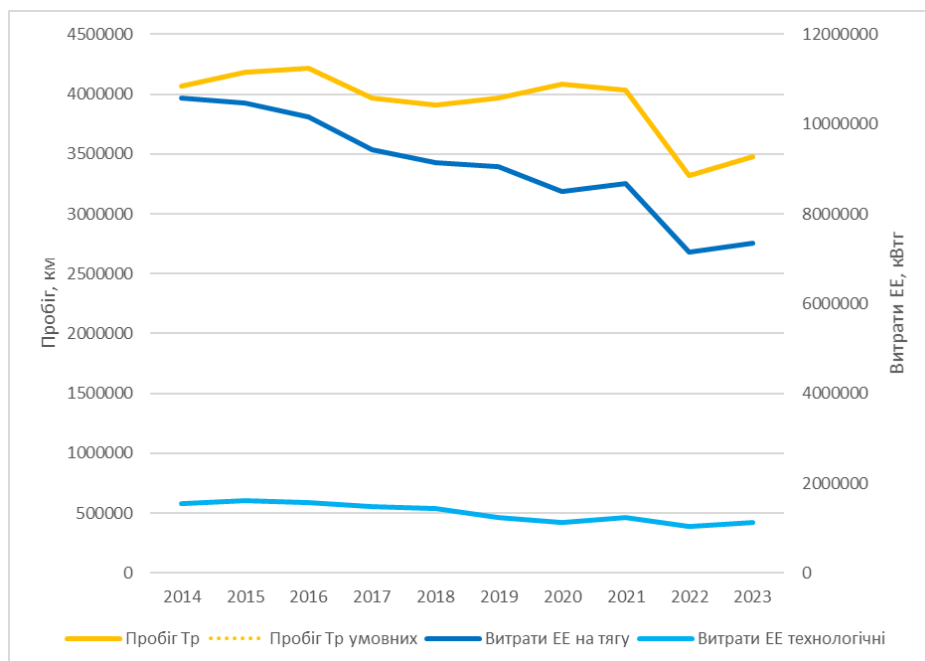
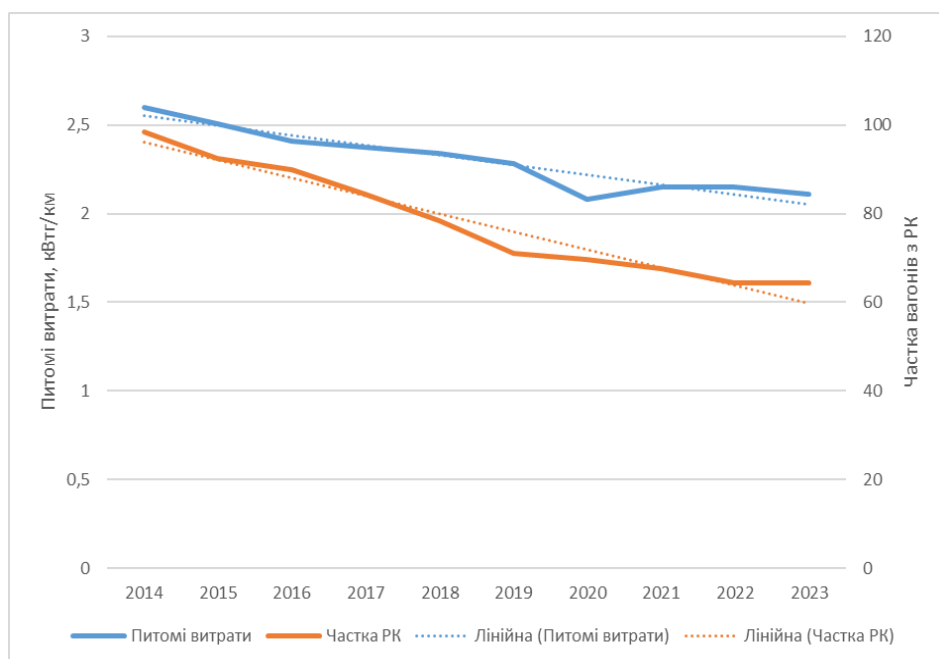


Рисунок О.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Хмельницький.

Розрахункові значення питомих витрат на 1 км пробігу умовних тролейбусів:

- тролейбуси з реостатними системами керування – 2,6 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 1,14 кВт·год/км.



Питомі витрати перебувають на середньоукраїнському рівні. За 10 років частка рухомого складу з реостатними системами керування скоротилася на 34%, що забезпечило зниження середніх питомих витрат на тягу на 18,8% (рис. О.2).

Рисунок О.2. Криві питомих витрат на тягу та частки рухомого складу з РК системами міста Хмельницький.

Єдине депо не має електроопалення. Витрати

електроенергії на технологічні потреби не корелюють з обсягами руху та демонструють тенденцію до поступового зниження протягом досліджуваного періоду, яке загалом склало 27,6%.

Таблиця О.1. Розрахунок показників міста Хмельницький

Місто, назва підприємства:		Хмельницький, ХКП "Електротранс"									
№	Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:	12132816	12091101	11713015	10907263	10594659	10301215	9622763	9912975	8172207	8471736
1а	на тягу (виміряні на тягових підстанціях), кВтг	10581147	10471525	10152075	9422515	9151830	9060193	8503958	8676177	7141323	7348643
	частка, %	87,21097	86,60522	86,67346	86,38753	86,38154	87,95266	88,3733	87,5234	87,3855	86,7431
	розрахункове значення	10479906	10423391	10358546	9454819	9009043	8752674	8915981	8704362	7019942	7353486
	різниця / цільова функція	9,15E-05	2,11E-05	0,000414	1,18E-05	0,000243	0,001152	0,00235	1,1E-05	0,00029	4,3E-07
	питомі витрати середні, кВтг/км	2,599543	2,505462	2,410046	2,376597	2,341073	2,281755	2,08288	2,14999	2,14854	2,11063
1б	на електроопалення депо, кВтг	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Технологічні витрати	1551669	1619576	1560940	1484748	1442829	1241022	1118805	1236798	1030884	1123093
	частка, %	12,78903	13,39478	13,32654	13,61247	13,61846	12,04734	11,6267	12,4766	12,6145	13,2569
3	Власні джерела енергії:										
3а	Тип (фотопанелі і т. ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3б	Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3в	Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Кількість депо	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4а	...з них з електроопаленням	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Тролейбусна мережа										
7а	Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш-км	4070388	4179479	4212398	3964709	3909246	3970712	4082795	4035443	3323797	3481723
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів, маш-км	4070388	4179479	4212398	3964709	3909246	3970712	4082795	4035443	3323797	3481723
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів РК, маш-км	4001978	3861043	3783357	3344146	3066736	2822159	2840205	2727661	2136727	2238251
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕС, маш-км	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕР, маш-км	68409,88	318436,5	429040,5	620563,1	842509,9	1148553	1242590	1307782	1187070	1243473
7б	Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199
	Коефіцієнт використання тролейбусної мережі (проїздів за годину	2,334956	2,397535	2,409817	2,274333	2,242517	2,277777	2,33567	2,31491	1,90668	1,99727
	Коефіцієнт використання тролейбусної мережі умовний	2,334956	2,397535	2,416419	2,274333	2,242517	2,277777	2,34207	2,31491	1,90668	1,99727
8	Кількість тролейбусів за типом	119	105	108	115	116	121	115	108	98	98
8а	Одинарні	119	105	108	115	116	121	115	108	98	98
	з реостатною системою керування	117	97	97	97	91	86	80	73	63	63
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	2	8	11	18	25	35	35	35	35	35
8б	Умовних тролейбусів (приведених до одинарного)	119	105	108	115	116	121	115	108	98	98
	з реостатною системою керування	117	97	97	97	91	86	80	73	63	63
	частка, %	98,31933	92,38095	89,81481	84,34783	78,44828	71,07438	69,5652	67,5926	64,2857	64,2857
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	2	8	11	18	25	35	35	35	35	35
	частка, %	1,680672	7,619048	10,18519	15,65217	21,55172	28,92562	30,4348	32,4074	35,7143	35,7143

Додаток П. Чернівці

На кривих пробігу та витрат електроенергії Чернівців (рис. П.1) спостерігаються суттєві коливання обсягів руху. При цьому є тенденція до зростання в перерахунку на умовні одиниці за рахунок збільшення частки зчленованих тролейбусів. Коливання кривих витрат електроенергії на тягу не дають чіткого уявлення про тенденції.

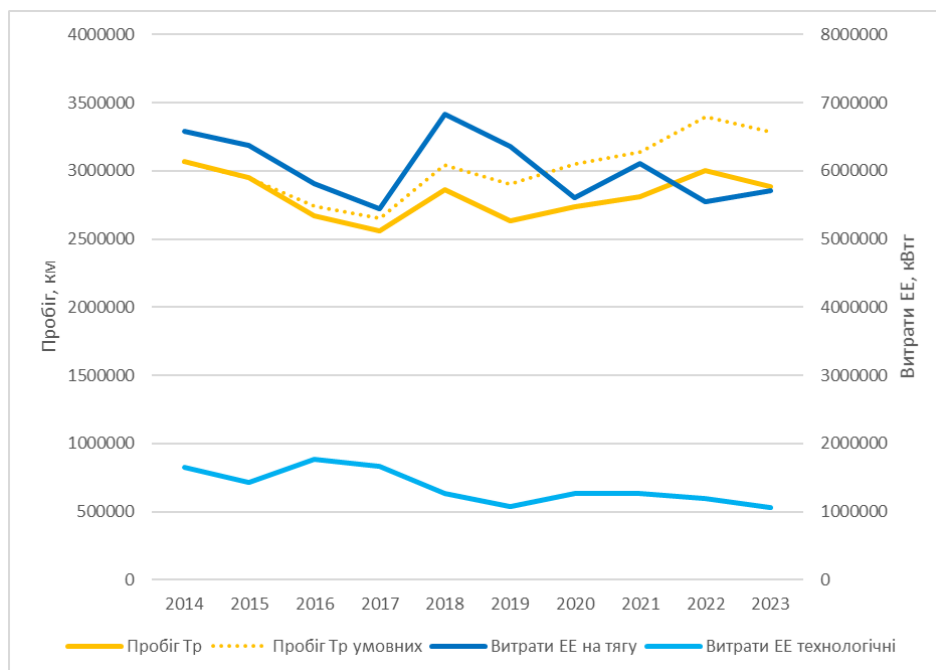
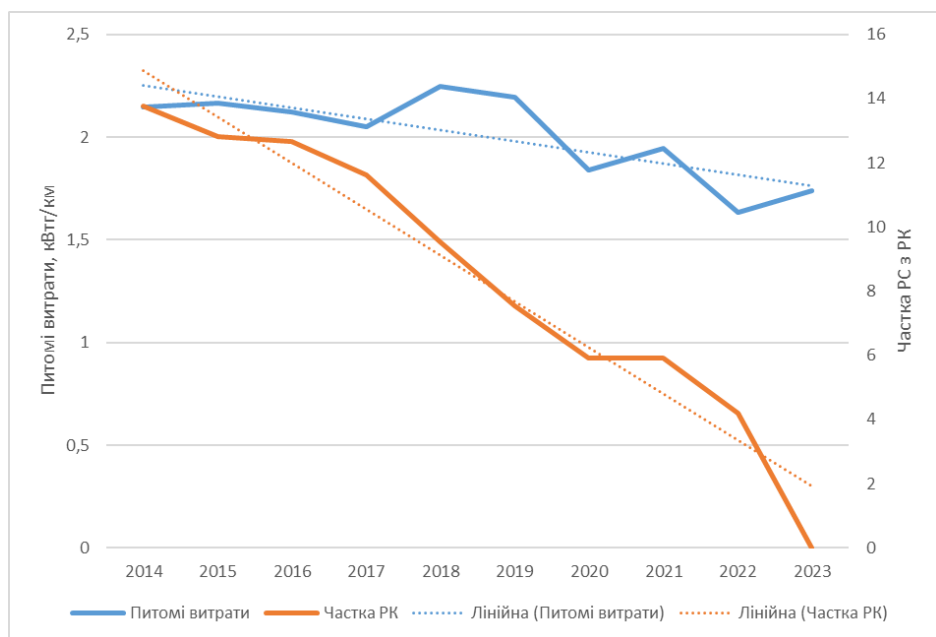


Рисунок П.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Чернівці.

Розрахункові значення

питомих витрат на 1 км пробігу умовних тролейбусів:

- тролейбуси з реостатними системами керування – 2,91 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування без рекуперації – 2,2 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 1,2 кВт·год/км.



Питомі витрати перебувають на середньоукраїнському рівні. За 10 років і без того мала частка рухомого складу з реостатними системами керування скоротилася з 13,8% до 0%. Одночасно збільшилася частка рухомого складу з електронними системами та рекуперацією на 36,4%, що забезпечило зниження середніх питомих витрат на тягу на 18,9% (рис. П.2).

Рисунок П.2. Криві питомих витрат на тягу та частки рухомого складу з

РК системами міста Чернівці.

Станом на вересень 2024 року обидва тролейбусні депо підприємства мали електроопалення, окремий облік споживання якого не вівся. Витрати електроенергії на технологічні потреби, включно з опаленням, мають тенденцію до поступового зниження протягом досліджуваного періоду, яке загалом склало 35,7%.

Таблиця П.1. Розрахунок показників міста Чернівці

Місто, назва підприємства: Чернівці, КП "Чернівецьке тролейбусне управління"											
№	Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:	8228200	7816775	7587032	7108143	8098991	7443800	6865821	7373675	6749040	6776909
1а	натягу (виміряні натягових підстанціях), кВтг	6579600	6380994	5814503	5442772	6824970	6364998	5604294	6103134	5550352	5717474
	частка, %	79,964	81,6321	76,6374	76,5709	84,2694	85,5074	81,626	82,7692	82,2391	84,367
	розрахункове значення	6668220	6376736	5925444	5749378	6318411	5575216	5727307	5895471	6112359	5626532
	різниця / цільова функція	0,00018	4,5E-07	0,00036	0,00317	0,00551	0,0154	0,00048	0,00116	0,01025	0,00025
	питомі витрати середні, кВтг/км	2,14445	2,16496	2,12346	2,05136	2,24448	2,19165	1,83814	1,94466	1,63402	1,73997
1б	на електроопалення депо, кВтг	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Технологічні витрати	1648600	1435781	1772529	1665371	1274021	1078802	1261527	1270541	1198688	1059435
	частка, %	20,036	18,3679	23,3626	23,4291	15,7306	14,4926	18,374	17,2308	17,7609	15,633
3	Власні джерела енергії:										
3а	Тип (фотопанелі і т. ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3б	Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3в	Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Кількість депо	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4а	...з них з електроопаленням	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
7	Тролейбусна мережа										
7а	Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш-км	3068200	2947400	2668900	2560701	2863802	2630222	2733485	2813745	3003435	2884340
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів, маш-км	3068200	2947400	2738222	2653256	3040779	2904203	3048887	3138408	3396742	3285957
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів РК, маш-км	421878	377872	346610	308518	289598	219185	180230	185522	143021	0
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕС, маш-км	2262798	2191656	2045001	2036220	2171985	1712384	1757240	1808836	1787759	1679489
	Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕР, маш-км	383525	377872	346610	308518	579196	972634	1111417	1144050	1465962	1606468
7б	Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км	86,7	86,7	86,7	86,7	86,7	86,7	86,7	86,7	86,7	86,7
	Коефіцієнт використання тролейбусної мережі (проездів за годину)	4,03981	3,88075	3,50446	3,3716	3,77068	3,46313	3,58926	3,70477	3,95453	3,79772
	Коефіцієнт використання тролейбусної мережі умовний	4,03981	3,88075	3,60533	3,49346	4,0037	3,82388	4,01438	4,13225	4,47239	4,32652
8	Кількість тролейбусів за типом	80	78	77	83	89	96	91	91	84	79
8а	Одинарні	80	78	73	77	78	76	70	70	62	57
	з реостатною системою керування	11	10	10	10	9	8	6	6	4	0
	з електронною системою керування без рекуперації	59	58	53	57	51	46	42	42	32	28
	з електронною системою керування та рекуперацією	10	10	10	10	18	22	22	22	26	29
8б	Зчленовані	0	0	4	6	11	20	21	21	22	22
	з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	4	6	11	11	11	11	12	12
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	9	10	10	10	10
8г	Умовних тролейбусів (приведених до одинарного)	80	78	79	86	94,5	106	101,5	101,5	95	90
	з реостатною системою керування	11	10	10	10	9	8	6	6	4	0
	частка, %	13,75	12,8205	12,6582	11,6279	9,52381	7,54717	5,91133	5,91133	4,21053	0
	з електронною системою керування без рекуперації	59	58	59	66	67,5	62,5	58,5	58,5	50	46
	частка, %	73,75	74,359	74,6835	76,7442	71,4286	58,9623	57,6355	57,6355	52,6316	51,1111
	з електронною системою керування та рекуперацією	10	10	10	10	18	35,5	37	37	41	44
	частка, %	12,5	12,8205	12,6582	11,6279	19,0476	33,4906	36,4532	36,4532	43,1579	48,8889

Додаток Р. Чернігів

На кривих пробігу та витрат електроенергії Чернігова (рис. Р.1) спостерігається суттєве поступове зменшення обсягів руху тролейбусів з різким падінням у 2022 році під час повномасштабного вторгнення РФ. При цьому зниження витрат електроенергії на тягу має випереджальний характер за рахунок поступового зменшення частки енергоємного рухомого складу в структурі парку.

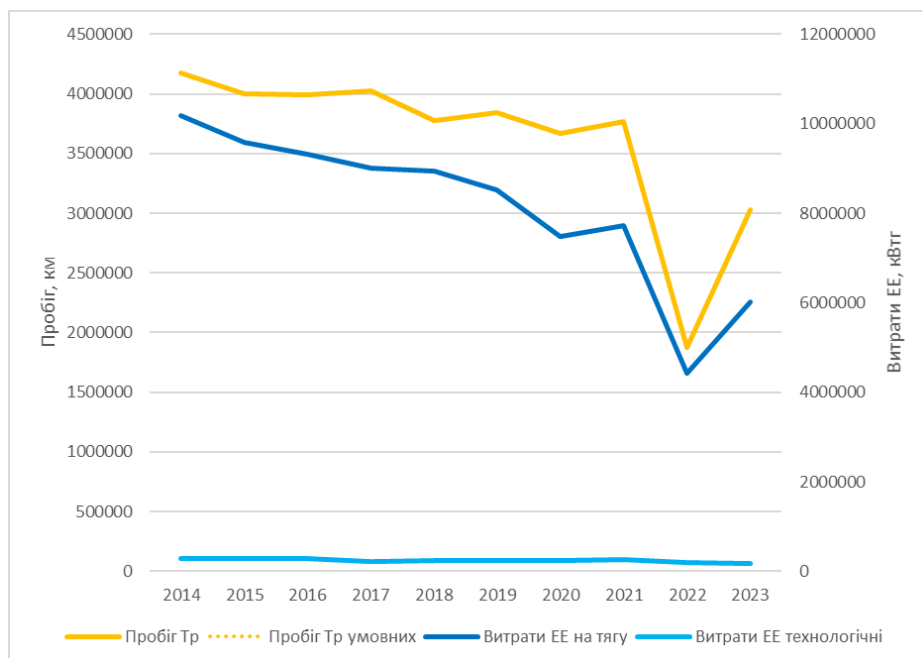
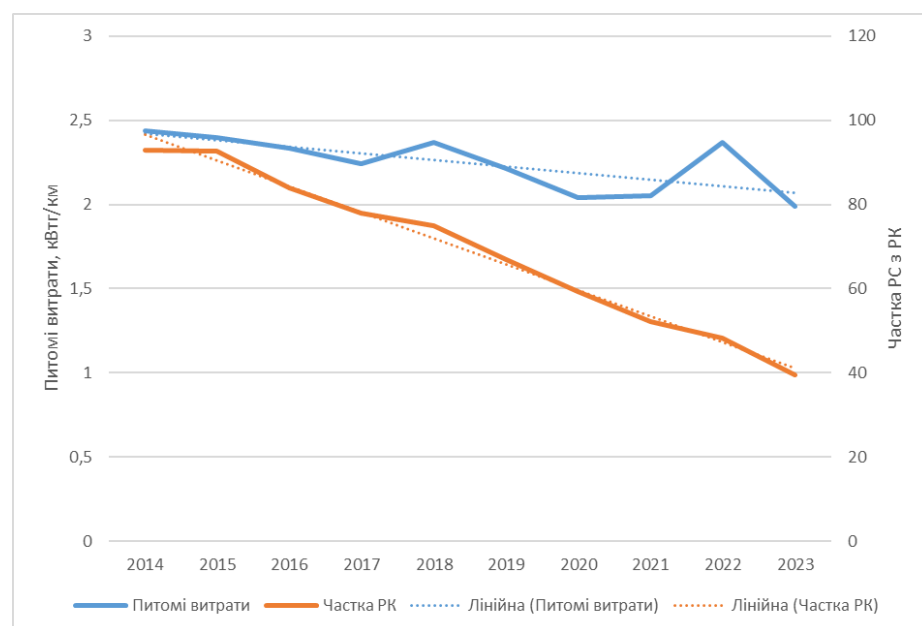


Рисунок Р.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Чернігів.

Розрахункові значення питомих

витрат на 1 км пробігу умовних тролейбусів:

- тролейбуси з реостатними системами керування – 2,45 кВт·год/км;
- тролейбуси з електронними системами керування та рекуперацією – 1,76 кВт·год/км.



Питомі витрати перебувають на середньоукраїнському рівні. За 10 років частка рухомого складу з реостатними системами керування скоротилася на 53,4%. Це забезпечило зниження середніх питомих витрат на тягу на 18,5% (рис. Р.2).

Рисунок Р.2. Криві питомих витрат на тягу та частки рухомого складу з РК системами міста Чернігів.

Витрати електроенергії на технологічні потреби розраховані за мінусом витрат на опалення мають дуже низькі

значення (на рівні 2-3% від загальних витрат, в рази менше ніж в середньому по Україні), що може бути наслідком некоректного розрахункового значення, яке використовує підприємство. Тому для розрахунку окремі дані витрат на опалення прийняті нульові, а розрахункові включені в інші технологічні потреби.

Таким чином витрати на технологічні потреби та опалення не мають кореляції з об'ємами руху, але мають тенденцію поступового зниження протягом досліджуваного періоду, яке загалом склало 23,6%.

Таблиця Р.1. Розрахунок показників міста Чернігів

Місто, назва підприємства: Чернігів, КП "Чернігівське тролейбусне управління"										
Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:	11241519	10678656	10360068	9810951	9840019	9393277	8363121	8756518	5247683	6829868
на тягу (виміряні на тягових підстанціях), кВтг	10180587	9592853	9311290	9017600	8944227	8513945	7484393	7726178	4433855	6019437
частка, %	90,56238	89,83203	89,87673	91,9136	90,8964	90,6387	89,4928	88,2335	84,4917	88,134
розрахункове значення	10020111	9602011	9336398	9243701	8591145	8541611	7957480	7983180	3914742	6152573
різниця / цільова функція	0,000248	9,11E-07	7,27E-06	0,00063	0,00156	1,1E-05	0,004	0,00111	0,01371	0,00049
питомі витрати середні, кВтг/км	2,438578	2,396822	2,331318	2,24125	2,37028	2,21416	2,03978	2,05106	2,36876	1,98743
на електроопалення депо, кВтг	764965	796749	765901	572457	648346	634141	647773	756578	615637	631058
частка, %	7,513958	8,305652	8,225509	6,34822	7,24877	7,44826	8,65498	9,7924	13,8849	10,4837
Технологічні витрати	295967	289054	282877	220894	247446	245191	230955	273762	198191	179373
частка, %	2,632803	2,706839	2,730455	2,2515	2,51469	2,61028	2,76159	3,12638	3,77673	2,6263
Власні джерела енергії:										
Тип (фотопанелі і т. ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Кількість депо	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
...зник з електроопаленням	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Тролейбусна мережа										
Сумарний річний пробіг тролейбусів, маш-км	4174805	4002322	3994003	4023461	3773483	3845227	3669207	3766928	1871801	3028748
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів, маш-км	4174805	4002322	3994003	4023461	3773483	3845227	3669207	3766928	1871801	3028748
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів РК, маш-км	3876605	3710486	3347355	3138300	2830112	2575929	2178592	1967174	902073	1196542
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕС, маш-км	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сумарний річний пробіг умовних тролейбусів ЕР, маш-км	298200,4	291836	646648,1	885161	943371	1269298	1490615	1799754	969728	1832206
Довжина контактної мережі в односторонньому обчисленні, км	106,671	106,671	106,671	110,471	110,471	110,471	110,471	110,471	82,371	99,771
Коефіцієнт використання тролейбусної мережі (проїздів за годину	4,467718	4,283133	4,262552	4,15765	3,89933	3,97347	3,78122	3,89256	2,59407	3,46541
Коефіцієнт використання тролейбусної мережі умовний	4,467718	4,283133	4,27423	4,15765	3,89933	3,97347	3,79158	3,89256	2,59407	3,46541
Кількість тролейбусів за типом	98	96	105	100	104	103	96	90	83	81
Одинарні	98	96	105	100	104	103	96	90	83	81
з реостатною системою керування	91	89	88	78	78	69	57	47	40	32
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	7	7	17	22	26	34	39	43	43	49
Умовних тролейбусів (приведених до одинарного)	98	96	105	100	104	103	96	90	83	81
з реостатною системою керування	91	89	88	78	78	69	57	47	40	32
частка, %	92,85714	92,70833	83,80952	78	75	66,9903	59,375	52,2222	48,1928	39,5062
з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
з електронною системою керування та рекуперацією	7	7	17	22	26	34	39	43	43	49
частка, %	7,142857	7,291667	16,19048	22	25	33,0097	40,625	47,7778	51,8072	60,4938

Додаток С. Краків

На кривих пробігу та витрат електроенергії Кракова на рис. С.1 видно, що в цілому об'єми руху трамваїв та витрати електроенергії залишаються стабільними. Суттєве зменшення спостерігається лише в період пандемії COVID-19.

Окремо слід звернути увагу на те, що пробіг в умовних вагонах приблизно вдвічі більший, через те що в роботі використовуються переважно довгі трамвайні вагони, що є типовим для Європейських міст, бо підвищує ефективність використання дорогої трамвайної інфраструктури, і нетипово для України.

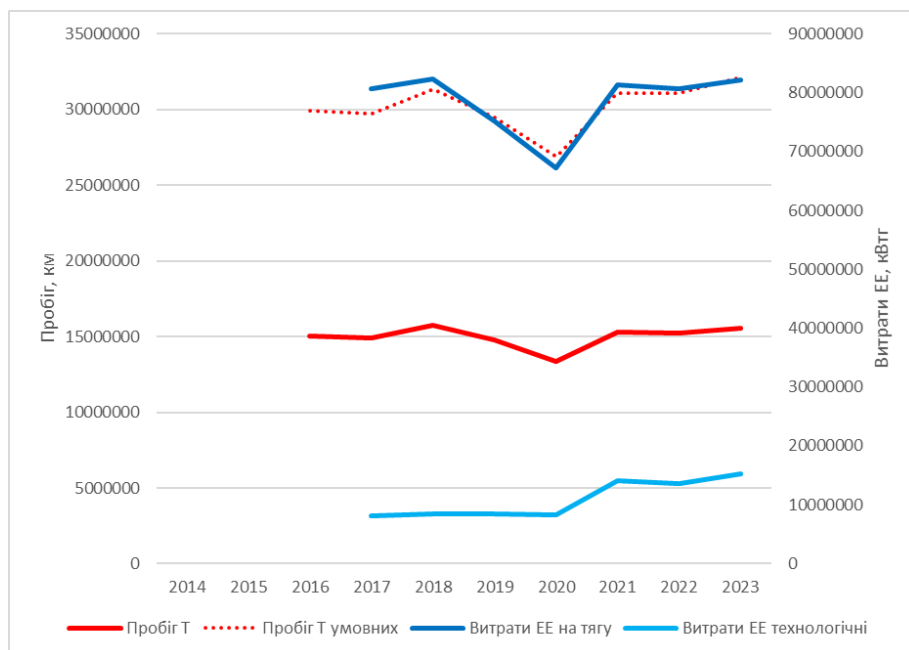
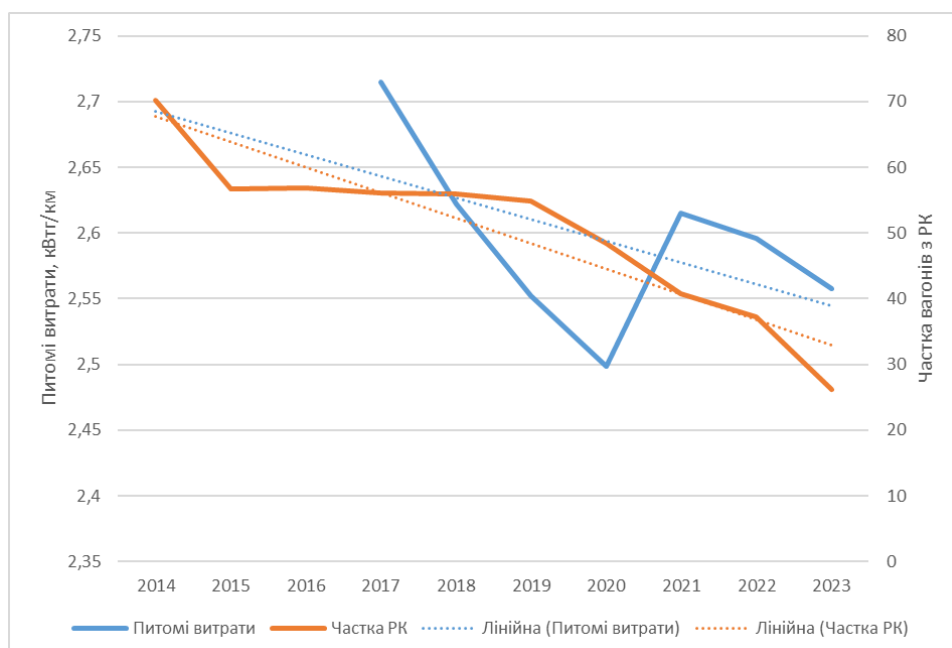


Рисунок С.1. Криві витрат електроенергії та пробігу міста Краків.

Розрахункові значення питомих витрат на 1 км пробігу умовних трамваїв:

- трамваї з реостатними системами керування – 2,69 кВт·год/км;
- трамваї з електронними системами керування з рекуперацією – 2,51 кВт·год/км.



За 7 років частка рухомого складу в умовних одиницях з реостатними системами керування була зменшена на 30%, що забезпечило зниження середніх питомих витрат на тягу на 5,8% (рис. С.2).

Рисунок С.2. Криві питомих витрат на тягу та частки рухомого складу з РК системами міста Краків.

Витрати електроенергії на технологічні потреби протягом досліджуваного періоду мають тенденцію до зростання, особливо різко з 2021 року. Залежність від об'ємів руху не прослідковується. Частка

технологічних витрат за 7 років в абсолютних одиницях зросла на 88,1%. Частка у загальних витратах електроенергії підприємством склала 10-15%. Але цей показник також включає розвинену автобусну інфраструктуру, тому пряме порівняння з українськими містами неможливе.

Таблиця С.1. Розрахунок показників міста Краків

Місто, назва підприємства: Краків, MPK S.A. w Krakowie											
№	Параметр	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	Загальні річні витрати електроенергії підприємством, кВтг, з них:				88708638	90725427	83744337	75476272,6	95422973,78	94264237,9	97397334,02
1a	на тягу (виміряні на тягових підстанціях), кВтг				80623636	82260330	75247985	67192725	81356170	80606052	82191423
	частка, %				90,88589	90,66954	89,85442	89,0249646	85,25846729	85,5107449	84,38775438
	розрахункове значення			78178978	77496945	81848430	76864093	69798852,3	80340437,4	80006658,9	82170121,02
	різниця / цільова функція				0,001504	2,51E-05	0,000461	0,00150434	0,000155875	5,5295E-05	6,71718E-08
	питомі витрати середні, кВтг/км				2,714624	2,622117	2,552412	2,49893266	2,615373624	2,59578237	2,557989151
1б	на електроопалення депо, кВтг	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %				0	0	0	0	0	0	0
	Технологічні витрати				8085002	8460097	8496352	8283547,6	14066809,78	1368181,85	15205911,02
	частка, %				9,114109	9,330457	10,14558	10,9750364	14,74153271	14,4892551	15,61224562
3	Власні джерела енергії:										
3a	Тип (фотопанелі і т. ін.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3б	Встановлена потужність (кВт)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3в	Річний генерація (кВтг)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Кількість депо	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
4a	...з них з електроопаленням	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Трамвайна мережа										
5a	Сумарний річний пробіг трамваїв, ваг-км			15043444	14906753	15740445	14784000	13338000	15288000	15234556	15575968
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв, ваг-км			29946013	29699740	31371728	29481134	26888693,7	31106901,61	31052700,3	32131263,33
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв РК, ваг-км	0	0	17045882	16680171	17553941	16197250	13008666,7	12692481,03	11552468,6	840361,178
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕС, ваг-км	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Сумарний річний пробіг умовних трамваїв ЕР, ваг-км	0	0	12900131	13019568	13817787	13283883	13879903	18414420,58	19500231,7	23727702,15
5б	Довжина трамвайної мережі в однокільному обчисленні, км	343	349	354	354	349	353	365	365	364	373
	Коефіцієнт використання трамвайної мережі (проїздів за годину)	0	0	4,837842	4,807017	5,14858	4,780938	4,16011678	4,781384875	4,7777598	4,76696692
	Коефіцієнт використання трамвайної мережі умовний	0	0	9,66764	9,577348	10,26145	9,533785	8,4051076	9,728811412	9,73654066	9,83365264
6	Кількість трамваїв за довжиною	266	290	299	297	298	295	297	311	315	334
6a	15-20 м	10	10	11	10	10	9	10	9	9	8
	з реостатною системою керування	10	10	11	10	10	9	10	9	9	8
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6б	25-30 м	132	140	165	165	165	165	150	145	144	136
	з реостатною системою керування	77	85	110	107	107	105	90	84	83	74
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	55	55	55	58	58	60	60	61	61	61
6в	30-40 м	123	109	86	85	86	84	100	120	125	154
	з реостатною системою керування	98	79	61	61	61	59	55	46	38	19
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	25	24	25	24	25	25	45	74	87	135
6г	більше 40 м	1	37	37	37	37	37	37	37	37	37
	з реостатною системою керування	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	1	37	37	37	37	37	37	37	37	37
6ж	Умовних вагонів (приведених до довжини 15 м)	514,933	588	535,2	591,7333	593,9833	588,2667	598,733333	632,8	642,06667	689
	з реостатною системою керування	361,733	333,8	338,8	332,3333	332,3333	323,2	289,66667	258,2	238,86667	180,2
	частка, %	70,2486	56,7687	56,92204	56,16269	55,95465	54,94107	48,3799131	40,80278129	37,2027827	26,15394615
	з електронною системою керування без рекуперації	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	частка, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	з електронною системою керування та рекуперацією	153,2	254,2	256,4	259,4	261,6	265,0667	309,06667	374,6	403,2	508,8
	частка, %	29,7514	43,2313	43,07796	43,83731	44,04535	45,05893	51,6200869	59,19721871	62,7972173	73,84615385