

УДК 621.311

Гліб Стрункін, <https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>

ТОВ «Плутон ІС», вул. Новобудов, 5, Запоріжжя, 69076, Україна

e-mail: strunkingleb@gmail.com

СПОСІБ ВИКОРИСТАННЯ ПРИХОВАНОЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДИСИПАТИВНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Анотація. У статті розглянуто проблему рекуперації в міському електротранспорті, пов'язану з використанням рухомого складу з вторинного ринку, що призводить до виходу з ладу вагонів. Через існуюче законодавство електротранс стикаються з неможливістю віддачі енергії рекуперації в мережу середньої напруги. Для вирішення проблеми підвищення напруги в контактній мережі ТОВ «Плутон ІС» запропонувало використання транзисторних обмежувачів напруги для розсіювання енергії на блоках резисторів. У статті описано роботу ОНТр (обмежувача напруги транзисторного) для утилізації енергії рекуперації. Проаналізовано потенціал та запропоновано рішення, яке підвищує загальну енергоефективність в системі шляхом використання рекупераційної енергії у вигляді тепла для гарячого водопостачання чи опалення побутових приміщень. Для впровадження методу дисипативне розсіювання енергії гальмування в повітря замінюється передачею тепла від водоохолоджуваного резистора до проточної води, яку можна використати для гарячого водопостачання чи опалення. У якості буфера використовується водяний акумулятор енергії, за допомогою якого вирівнюється імпульсний характер дисипації. Наведено результати вимірювання енергії рекуперації, яку можна використати для опалення. Розраховано площу приміщення, яку можна опалювати цією енергією, та об'єм води, який можна нагріти для подальшого використання. Обчислено вуглецевий слід у розмірі 9,9 кг, який дозволяє зменшити використання обмежувача напруги, та виконано порівняння викидів від руху автомобіля й спалювання природного газу. Запропоновано альтернативне використання тепла рекуперації для гарячого водопостачання побутових приміщень.

Ключові слова: енергія рекуперації, дисипативне розсіювання, енергоефективність, тепловий акумулятор, опалювання, вуглецевий слід.

1. Вступ

Поповнення парку міського електротранспорту в Україні вживаним рухомим складом з ЄС створює проблему технічної неоднорідності на маршрутах. Зокрема, через розбіжність порогів рекуперації виникають аварійні ситуації з вагонами, що мають нижчі за напругою експлуатаційні характеристики. Враховуючи відсутність гарантійного сервісу та дефіцит запчастин для застарілих моделей, критично важливим стає уніфікація максимальної напруги в мережі.

Впровадження рекуперативного гальмування в системах міського електричного транспорту є об'єктом численних досліджень [1, 2], проте його практична реалізація стикається з низкою суттєвих перешкод. Зокрема, високий електричний опір контактної мережі нівелює ефективність передачі енергії від транспортного засобу до підстанції [3]. Додатковим стримуючим фактором є нормативно-правові обмеження: у багатьох країнах, включно з Україною, діє пряма заборона на повернення надлишкової енергії від тягових підстанцій до загальної мережі середньої напруги [4].

Як альтернативу інвертуванню енергії [5] розглядають встановлення накопичувальних систем (суперконденсаторів або акумуляторних батарей) безпосередньо на підстанціях [6, 7]. Це дозволило б акумулювати енергію під час гальмування та використовувати її для потреб тяги. Однак надвисока вартість таких накопичувачів робить подібні проекти економічно необґрунтованими. Водночас

© Стрункін Г., 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC0 1.0 Universal
<https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0>

розміщення накопичувальних пристроїв на борту рухомого складу є недоцільним через значне збільшення маси вагона та додаткове навантаження на ходову частину [8, 9].

Враховуючи експлуатацію на лініях різнотипного рухомого складу з відмінними технічними параметрами рекуперації, виникає потреба у швидкому та ефективному технічному рішенні [10–12]. Найбільш перспективним варіантом є використання стаціонарних блоків резисторів на тягових підстанціях для розсіювання надлишкової енергії [13, 14]. Проте такий підхід вважається неенергоефективним через розсіювання енергії рекуперації в повітрі у вигляді тепла. Спеціалістами ТОВ «Плутон ІС» після впровадження дисипативної утилізації енергії рекуперації міського електротранспорту було запропоновано підвищити загальну ефективність методу шляхом використання теплової енергії для нагрівання води або опалення приміщення.

Метою статті є аналіз потенціалу енергії рекуперації міського електротранспорту для опалення приміщення підстанції ТП-7 у м. Дніпро.

2. Методи та матеріали

У межах допомоги від ЄС міста Східної Європи отримують вживаний рухомий склад із різномірними технічними характеристиками, зокрема з різними порогами рекуперації та спрацювання гальмівних резисторів [10–12]. Хоча використання інверторів на тягових підстанціях (рис. 1) дозволяє нівелювати технічну несумісність обладнання шляхом встановлення мінімальної уставки інвертування, виникає правова перешкода. Чинна нормативна база України, Польщі та Румунії класифікує повернення енергії в мережу середньої напруги для міського електричного транспорту як непогоджену генерацію. Процедура легалізації такої видачі потужності є неможливою через непередбачуваність обсягів енергії, що залежать від графіка руху та пасажиропотоку [4].

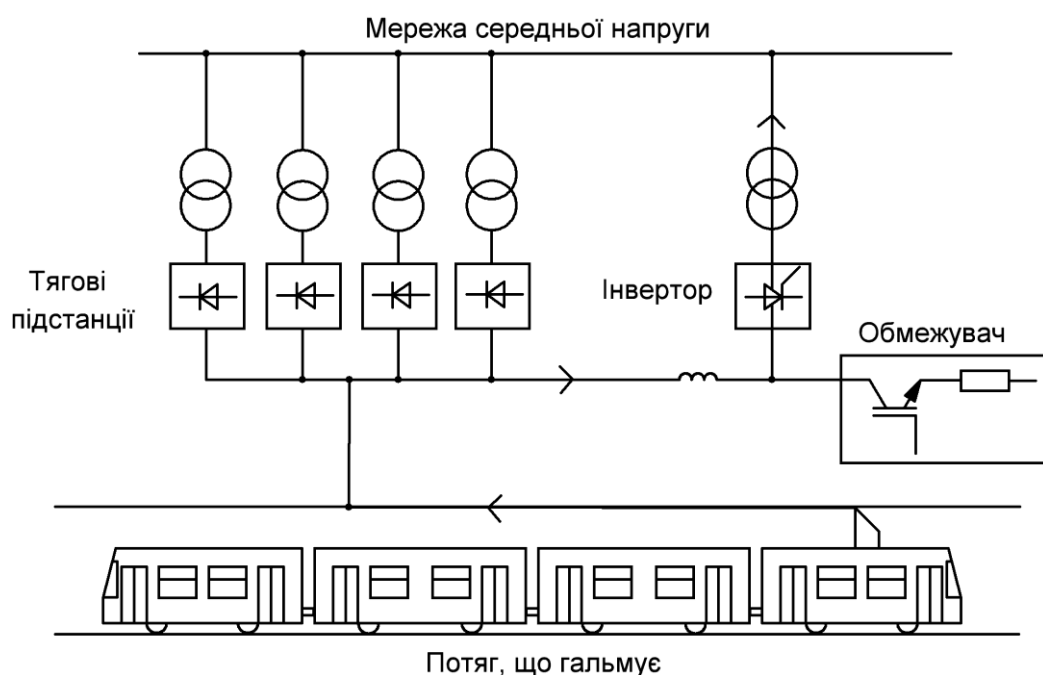


Рисунок 1. Схема використання енергії рекуперації на підстанції

У ситуаціях, коли рекуперація енергії рухомих складом (зокрема, під час руху на спусках) супроводжується тривалими перенапругами в контактній мережі за відсутності споживачів, виникає потреба в застосуванні спеціалізованих захисних пристроїв. На рис. 1 представлено технічне рішення, впроваджене автором у ТОВ «Плутон ІС» на об'єктах міського електротранспорту в містах Орадя (Румунія) та Дніпро (Україна) [5, 15]. Замість традиційного інвертора пропонується встановлення транзисторного обмежувача напруги (IGBT-чопера) з блоком резисторів (рис. 1). При перевищенні порогового рівня напруги на шинах, зумовленого гальмуванням поїзда, транзистор відкривається,

забезпечуючи розсіювання надлишкової енергії на резисторах. Попри низьку енергоефективність, такий підхід є критично важливим для захисту обладнання в умовах відсутності внутрішнього споживання або законодавчої заборони на видачу енергії в мережу середньої напруги.

Якщо в м. Орадя використано дисипативне розсіювання енергії у повітря, то в м. Дніпро здійснюється пошук загального збільшення енергоефективності впровадженого пристрою без віддачі енергії в мережу середньої напруги.

3. Результати

На рис. 2 наведено фотографію зовнішнього вигляду розробленого в ТОВ «Плутон ІС» пристрою ОНТр (обмежувач напруги транзисторний), який являє собою два транзисторні комутатори (чопери), кожен з яких працює на свій блок резисторів з амплітудою струму 200 А.



Рисунок 2. Зовнішній вигляд обмежувача напруги ОНТр-450

На рис. 3 зображено вигляд двох чоперів, розташованих у шафі пристрою ОНТр. Опис роботи чопера наведено в літературі [5], тому далі не розглядається. При виникненні рекуперації рухомого складу напруга в контактній мережі підвищується. Датчик напруги в обмежувачі ОНТр передає вимірюване значення в систему керування, яка після перевищення деякого порогу подає керуючий імпульс на силовий транзистор чопера. Транзистор, вмикаючись у режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), забезпечує протікання струму через резистор навантаження, на якому й розсіюється зайва енергія. Необхідний коефіцієнт заповнення ШІМ визначається за допомогою регулятора напруги. Після завершення рекуперації напруга в контактній мережі знижується, що призводить до вимикання силового транзистора.

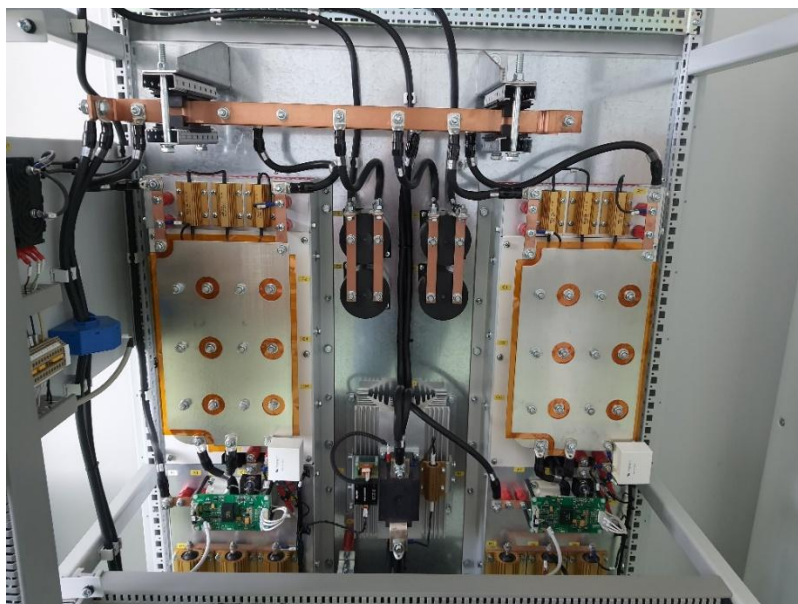


Рисунок 3. Фотографія чопера в шафі обмежувача напруги

Для м. Орадя розсіювання енергії здійснювалося за допомогою стійки з гальмівними резисторами. Згідно з технічним завданням резистори повинні були пропустити імпульс струму амплітудою $I_m = 200$ А з тривалістю включення ПВ = 0,5 та коефіцієнтом заповнення чопера $\gamma = 0,8$. Оскільки тепло залежить від квадрата струму, то при зміні ПВ сам струм має змінюватися пропорційно квадратному кореню від співвідношення цих тривалостей. При тривалому режимі ПВ = 1. У зв'язку з цим безперервний еквівалент струму I_{const} для випробування становив

$$I_{const} = I_m \cdot \gamma \cdot \sqrt{ПВ / 1} = 200 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{0,5} = 113,4 \quad (1)$$

На рис. 4 показано результат теплового випробування в лабораторії ТОВ «Плутон ІС».

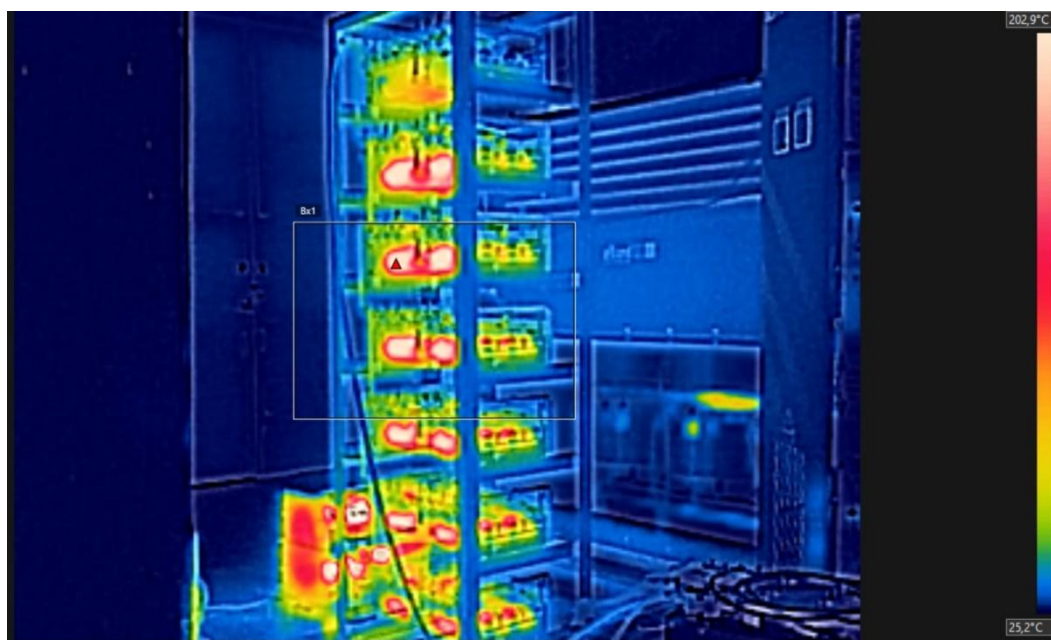


Рисунок 4. Теплові випробування блока резисторів (теплогограма)

Найгарячіша точка в блоці становила 202⁰С, а загальна кількість тепла в приміщенні підстанції при розміщенні обмежувача на об'єкті призвела до необхідності створення додаткової вентиляції. Під час наступного замовлення було поставлено внутрішнє для Компанії завдання щодо ефективного використання отриманого тепла. В основу використання енергії рекуперації рухомого складу

електротранспорту була покладена дисипативна утилізація кінетичної енергії руху з передачею тепла проточній воді, яка використовується для опалення приміщення диспетчерської та створення гарячого водопостачання побутового приміщення підстанції. За умови, що при амплітуді імпульсу струму 200 А та напрузі 700 В потужність становить $P = 140$ кВт (але тривалість імпульсу лише декілька секунд), потрібні резистори з великою допустимою кратністю перевантаження. Для реалізації такого способу було придбано водоохолоджувані резистори фірми Danotherm (рис. 5) [16].



Рисунок 5. Водоохолоджуваний резистор фірми Danotherm

Резистори мають такі параметри:

- номінальна потужність 40 кВт;
- номінальна робоча напруга 1000 В;
- гальванічне розв'язання 3,5 кВ;
- допустиме перевантаження 160 кВт за 8 секунд та 320 кВт за 1 секунду;
- теплова постійна часу 30 с;
- максимальна температура води на виході 60°C.

Оцінювальні розрахунки теплового акумулятора проведено за таких даних:

- вода в системі водопостачання $T_{in} = +15^{\circ}\text{C}$;
- максимальна температура води на виході резистора $T_{max} = +60^{\circ}\text{C}$;
- режим роботи $t = 5$ с, імпульс із періодом повторюваності $T = 2$ хвилини;
- температура води в акумуляторі $T_a = +50^{\circ}\text{C}$;
- протока води через тепловий акумулятор $Q = 2,5$ л/хв.

Енергія, що виділяється на резисторах за час імпульсу, повинна дорівнювати енергії, яку поглинає вода в акумуляторі:

$$P \cdot \gamma \cdot t = \rho \cdot V \cdot c \cdot (T_a - T_{in}) \quad (2)$$

Розрахунки за формулою (2) показують, що в такому випадку потрібний об'єм теплового акумулятора становить 4 л. Але, враховуючи, що гальмування виникають періодично, доцільним є обирати об'єм акумулятора на порядки більший, щоб уникнути великих коливань температури. Зручним є використання у якості теплового акумулятора стандартного побутового водоохолоджувача на 85 л з деяким доопрацюванням. Оскільки гідравлічний опір в контурі резистора невідомий, для забезпечення циркуляції води у його контурі потрібен циркуляційний насос потужністю не менше 125 Вт.

Завдяки гальванічному розв'язанню рідини, що протікає через резистор, від стінок приладу можливе використання проточної води для охолодження. На першому етапі впровадження було введено в експлуатацію першу чергу комплексу – безпосередньо обмежувач напруги з резисторами.

Зайве тепло утилізувалось за допомогою теплообмінника. Одночасно проводився моніторинг розсіяної енергії та коригувалися вихідні дані для розробки системи опалення. Результати вимірювання рекуперованої та розсіяної електроенергії за місяць наведено в таблиці 1 (дати зняття показників визначалися візитом чергової бригади на підстанцію).

Таблиця 1. Показники лічильника постійного струму (ОНТр тягової підстанції № 7)

№ п/п	Дата	Показники лічильника, кВт·год	Енергія, кВт·ч
1	20.11	10	0
2	21.11	43	33
3	22.11	64	21
4	23.11	80	16
5	24.11	100	20
6	27.11	264	164
7	28.11	282	18
8	29.11	318	36
9	30.11	355	37
10	01.12	395	40
11	02.12	429	34
12	03.12	471	42
13	04.12	535	64
14	05.12	555	20
15	18.12	866	311
16	21.12	1010	144

Середня потужність рекуперації за добу становила 32,3 кВт*год, що відповідає потужності 1,35 кВт. Середнє значення потужності за добу знайдено як частка між різницею показників лічильника на початку та в кінці спостережень до кількості днів $(1010-10)/31$.

Якщо прийняти коефіцієнт опалення 100 Вт/м^2 [17], то можна визначити, що цієї потужності вистачить для опалення площі $13,5 \text{ м}^2$ споруди із середнім утепленням.

Можна розрахувати енергоефективність у показниках вуглецевого сліду, за якими використання енергії рекуперації для опалення чи гарячого водопостачання дозволяє знизити вуглецевий слід в умовах України на 9,9 кг CO₂ на добу, що еквівалентно поїздки легковим автомобілем на відстань близько 60 км, або зекономити близько 4 м^3 природного газу [18].

4. Обговорення

Оцінювальні розрахунки показали перспективність методу. З огляду на те, що в системах з інвертуванням та електричним накопиченням для використання гальмівної енергії необхідне встановлення перетворювачів з ККД не вище 0,95 [19], системи з прямим використанням енергії у вигляді тепла можуть наближатися до традиційних систем. Оскільки в більшості країн Європи рекуперація в мережу середньої напруги для електротрансу стикається із законодавчими обмеженнями, а системи накопичення наразі мають високу вартість, використання елементів гарячого водопостачання для утилізації зайвої енергії може бути перспективним. Обсяги енергії, які рекуперуються з контактної мережі трамвая, є невеликими, тому економічно доцільним може бути використання лише недорогих рішень: електричні акумулятори мають обмежений ресурс [20] та досить високу вартість, тому термін їхньої окупності є тривалим.

Окремо слід зауважити, що в літній період доведеться застосувати розсіювання тепла за межами підстанції, для чого по завершенню опалювального сезону може бути використане перемикавання навантаження чопера з контуру опалення на зовнішній блок резисторів, аналогічний встановленим у м. Орадя. Оскільки перемикавання буде здійснюватися без струму, для цієї функції можна залучити дешевий контактор без дугогасильних камер, або навіть ручний перемикач з відповідними заходами безпеки.

Інший варіант утилізації енергії рекуперації – використання нагрітої води для гарячого водопостачання побутових приміщень підстанції – потрібно розглядати відповідно до санітарних норм та з узгодженням гідравлічного опору системи. Цей варіант – тема окремого дослідження.

5. Висновки

Результати дослідної експлуатації транзисторного обмежувача напруги на тяговій підстанції довели, що обсяг енергії, яку віддає рухомий склад під час гальмування, є невеликим. Використання електричних методів утилізації тепла мають або законодавчі обмеження, або високу вартість. Застосування теплових систем акумулювання дозволяє знизити вартість використання гальмівної енергії, спрямувати її на внутрішні потреби підстанції і внести свій вклад у загальну енергоефективність, що сприятиме зниженню вуглецевого сліду.

Фінансування роботи

Робота виконана в рамках поставки обмежувача напруги ОНТр на тягову підстанцію ТП-7 міського електротрансу м. Дніпро для боротьби з перенапругами, що пов'язані з рекуперацією рухомого складу.

Посилання

1. Павленко Т.П., Петренко О.М., Лукашова Н.П. Електропостачання транспорту: конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. 150 с.
2. Drozdowski P., Duda A. Modernised DC traction substation recuperating energy of braking. E3S Web of Conferences. 2016. Vol. 10. 00017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20161000017>
3. Cascetta F., Cipolletta G., Femine A., Fernández J., Gallo D., Giordano D., Signorino D. Impact of a reversible substation on energy recovery experienced on-board a train. *Measurement*. 2021. Vol. 183. 109793. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109793>
4. Про затвердження Кодексу систем розподілу: постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text> (дата звернення: 16.03.2026).
5. Стрункін Г.М. Застосування пристроїв силової електроніки. Дніпро: Середняк Т.К., 2024. 408 с. ISBN 978-617-8139-59-9. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15256472>
6. Fletcher D. I., Harrison R. F., Nallaperuma S. TransEnergy – a tool for energy storage optimization, peak power and energy consumption reduction in DC electric railway systems. *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 30. 101425. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101425>
7. Wieczorek M., Lewandowski M. Energy storage system in traction vehicle. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 180. 02008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818002008>
8. Ebadi R., Yazdankhah A. S., Mohammadi-Ivatloo B., Kazemzadeh R. Coordinated power and train transportation system with transportable battery-based energy storage and demand response: A multi-objective stochastic approach. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 275. 123923. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123923>
9. al-Ezee H., Tennakoon S., Taylor I., Scheidecker D., Schweickart J. An On-board Energy Storage System for Catenary Free Operation of a Tram. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2017. Vol. 15. No. 5. P. 540–544. <https://doi.org/10.24084/repqj15.386>
10. У Запоріжжі на лінію вийшли ще 2 європейські трамваї URL: <https://zp.gov.ua/uk/articles/item/3883/u-zaporizhzhhi-na-liniyu-vijshli-sche-2-evropejskih-tramvai> (дата звернення: 16.03.2026).
11. Tramvaiul din Oradea se modernizează cu vagoane aduse din Berlin și cu tramvaie noi achiziționate cu fonduri europene. Mobilitate.eu. 17.09.2018. URL: <https://mobilitate.eu/tramvaiul-oradea-vagoane-modernizate/> (Last accessed: 16.03.2026).
12. У Дніпрі на маршрути випустили 5 вживаних трамваїв з Німеччини. Інформатор Дніпро. 08.03.2025. URL: <https://dp.informator.ua/uk/u-dnipri-na-marshruti-vipustili-5-vzhivanih-tramvajiv-z-nimechchini> (дата звернення: 16.03.2026).
13. ENVILINE™ EDS Energy Dissipation System for DC rail transportation. URL: https://library.e.abb.com/public/ef17a1a91819f976c1257e0c0047951d/ENVILINE_EDS_4116PL857-W1-en_052013.pdf (Last accessed: 16.03.2026).
14. Стрункін Г. Обмежувач напруги для тягових підстанцій міського електротранспорту. *Технічні науки та технології*. 2025. № 1(39). С. 307–314. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-307-314](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-307-314)
15. Проектування, розробка та постачання двоагрегатної модульної тягової підстанції Сіцеро для трамвайної лінії м. Орадя. PLUTON. URL: <https://pluton.ua/news/design-development-and-supply-of-two-unit-modular-traction-substation-cicero-for-oradea-tram-line> (дата звернення: 16.03.2026).

16. WHDN. Danotherm. URL: <https://www.danotherm.com/power-resistors/liquid-cooled/whdn> (Last accessed: 16.03.2026).
17. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель: чинна редакція від 20.04.2023. Міністерство розвитку громад та територій України. Київ, 2021. База даних «Єдина державна електронна система у сфері будівництва». URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3075196638495507996 (дата звернення: 16.03.2026).
18. У DiXi Group порахували викиди вуглецю при виробництві електрики в Україні. Укрінформ. 08.11.2024. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3924981-u-dixi-group-porahuvali-vikidi-vugleacu-pri-virobnictvi-elektriki-v-ukraini.html> (дата звернення: 16.03.2026).
19. Ebadi R., Yazdankhah A. S., Kazemzadeh R., Mohammadi-Ivatloo B. Techno-economic evaluation of transportable battery energy storage in robust day-ahead scheduling of integrated power and railway transportation networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021. Vol. 126. Part A. 106606. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106606>
20. Janiga P., Zeman Y., Smilkova M., Bednárík I., Kompan D. Battery storage in traction power supply. Third International Conference ETIMA 2025. Vol. 3. No. 1. P. 297–303. <https://doi.org/10.46763/ETIMA2531297j>

References

1. Pavlenko, T.P., Petrenko, O.M., & Lukashov, N.P. (2018). Electrical supply to transport: lecture notes (for students of advanced forms, entry into specialty 141 – Electrical power engineering, electrical engineering and electrical mechanics). Kharkiv: O.M. Beketov NUUEKh [in Ukrainian].
2. Drozdowski, P., & Duda, A. (2016). Modernised DC traction substation recuperating energy of braking. E3S Web of Conferences, 10, 00017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20161000017>
3. Cascetta, F., Cipolletta, G., Femine, A., Fernández, J., Gallo, D., Giordano, D., & Signorino, D. (2021). Impact of a reversible substation on energy recovery experienced on-board a train. *Measurement*, 183, 109793. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109793>
4. On the Approval of the Distribution System Code: Resolution of the NEURC No. 310 dated March 14, 2018. Retrieved March 16, 2026, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text> [in Ukrainian].
5. Strunkin, G.M. (2024). *Application of power electronics devices*. Dnipro: Seredniak T.K. ISBN 978-617-8139-59-9 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15256472>
6. Fletcher, D. I., Harrison, R. F., & Nallaperuma, S. (2020). TransEnergy – a tool for energy storage optimization, peak power and energy consumption reduction in DC electric railway systems. *Journal of Energy Storage*, 30, 101425. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101425>
7. Wiecek, M., & Lewandowski, M. (2018). *Energy storage system in traction vehicle*. MATEC Web of Conferences, 180, 02008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818002008>
8. Ebadi, R., Yazdankhah, A. S., Mohammadi-Ivatloo, B., & Kazemzadeh, R. (2020). Coordinated power and train transportation system with transportable battery-based energy storage and demand response: A multi-objective stochastic approach. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123923. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123923>
9. al-Ezee, H., & Tennakoon, S., Taylor, I., Scheidecker, D., & Schweickart, J. (2017). An On-board Energy Storage System for Catenary Free Operation of a Tram. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 15(5), 540–544. <https://doi.org/10.24084/repqj15.386>
10. 2 more European trams entered the line in Zaporizhzhia. Retrieved March 16, 2026, from <https://zp.gov.ua/uk/articles/item/3883/u-zaporizhzhia-na-liniyu-vijshli-sche-2-evropejskih-tramvai> [in Ukrainian].
11. *Tramvaiul din Oradea se modernizează cu vagoane aduse din Berlin și cu tramvaie noi achiziționate cu fonduri europene*. (2018, September 17). Mobilitate.eu. Retrieved March 16, 2026, from <https://mobilitate.eu/tramvaiul-oradea-vagoane-modernizate/>
12. *In Dnipro, 5 used trams from Germany were released on routes*. (2025, March 8). Informator Dnipro. Retrieved March 16, 2026, from <https://dp.informator.ua/uk/u-dnipri-na-marshruti-vipustili-5-vzhivanih-tramvajiv-z-nimechchini> [in Ukrainian].
13. ENVILINE™ EDS Energy Dissipation System for DC rail transportation Retrieved March 16, 2026, from https://library.e.abb.com/public/ef17a1a91819f976c1257e0c0047951d/ENVILINE_EDS_4116PL857-W1-en_052013.pdf.
14. Strunkin, G. (2025). Voltage limiter for urban electric transport traction substations. *Technical Sciences and Technologies*, 1(39), 307–314 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-307-314](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-307-314)
15. *Design, development and supply of two-unit modular traction substation Cicero for Oradea tram line*. PLUTON. Retrieved March 16, 2026, from <https://pluton.ua/news/design-development-and-supply-of-two-unit-modular-traction-substation-cicero-for-oradea-tram-line> [in Ukrainian].
16. WHDN. Danotherm. Retrieved March 16, 2026, from <https://www.danotherm.com/power-resistors/liquid-cooled/whdn>
17. ДБН В.2.6-31:2021. (2021). Thermal insulation and Energy efficiency of buildings: current version as of 20.04.2023. Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine. Database "Single State Electronic System in the Field of Construction". Kyiv. Retrieved March 16, 2026, from https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3075196638495507996 [in Ukrainian].

18. DiXi Group calculated carbon emissions from electricity production in Ukraine. (2024, November 11). Ukrinform. Retrieved March 16, 2026, from <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3924981-u-dixi-group-porahuvali-vikidi-vuglecu-pri-virobnictvi-elektriki-v-ukraini.html> [in Ukrainian].
19. Ebadi, R., Yazdankhah, A. S., Kazemzadeh, R., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2021). Techno-economic evaluation of transportable battery energy storage in robust day-ahead scheduling of integrated power and railway transportation networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 126, 106606. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106606>
20. Janiga, P., Zeman, Y., Smitkova, M., Bednárík, I., & Kompan, D. (2025). Battery storage in traction power supply. *Third International Conference ETIMA 2025*, 3(1), 297–303. <https://doi.org/10.46763/ETIMA2531297j>

METHOD OF USING THE HIDDEN ENERGY EFFICIENCY OF DISSIPATIVE ENERGY RECUPERATION UTILIZATION OF ELECTRIC TRANSPORT

Hlib Strunkin, <https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>

PLUTON IC LLC, Novobudov St., 5, Zaporizhia, 69076, Ukraine

e-mail: strunkingleb@gmail.com

Abstract. The problem of urban electric transport recuperation when using rolling stock from the secondary market is shown, which leads to the breakdown of wagons. Due to the existing legislation, electric trans is faced with the impossibility of returning the recuperation energy to the medium voltage network. To overcome the problem of increasing the voltage in the contact network, Pluton IC LLC proposed the use of transistor voltage limiters for dissipating energy on resistor blocks. The operation of the ONTr limiter for utilizing the recuperation energy is described. The potential is analyzed and a solution is presented that increases the overall energy efficiency in the system by using the recuperation energy in the form of heat for hot plumbing system or heating of a domestic room. To implement the method, the dissipative dissipation of braking energy into the air is replaced by the transfer of heat in a water-cooled resistor to flowing water, which can be used for hot water supply or heating. As a buffer, a water energy accumulator is required, with the help of which it is possible to level out the pulse nature of the dissipation. The results of the measurement of the recuperation energy that can be used for heating are presented. The area of the room that can be heated with this energy and the volume of water that can be heated for use are calculated. A carbon footprint of 9.9 kg was calculated, which allows for reduced use of a voltage limiter, and a comparison was made between emissions from vehicle operation and natural gas combustion. A proposal for the alternative use of recovery heat for hot plumbing system of domestic premises is put forward for discussion.

Keywords: recuperation energy, dissipative dissipation, energy efficiency, thermal accumulator, heating, carbon footprint.

Дата першого надходження статті до журналу: 17.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.05.2026

Дата публікації (оприлюднення): 30.05.2026