

Гліб Миколайович Стрункін

магістр, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії «Промислова електроніка»,

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні

Запорізького національного університету, інженер ТОВ «Плутон ІС»

e-mail: strunkingleb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>. ResearcherID: LNQ-2155-2024

**ОБМЕЖУВАЧ НАПРУГИ ДЛЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ
МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ**

Наведено відомості про сучасний стан із рухомим складом міських електротранспортів східної Європи. Показано, що через наявність в експлуатації рухомого складу з істотно різними технічними параметрами, можливий вихід із ладу вагонів із найменшими максимальними значеннями параметрів унаслідок виникнення перенапруг через гальмування. У результаті заборони на генерацію електроенергії в мережу середньої напруги і через високу вартість накопичувачів єдиною можливістю боротьби з перенапругою залишається дисипативний спосіб. При цьому способі надлишкова енергія гальмування розсіюється на стаціонарних резисторах, які розташовано на тяговій підстанції. Презентовано роботу транзисторного обмежувача напруги, який було застосовано в міськелектротрансі Ораді та Дніпро. За допомогою методів штучного інтелекту було отримано оцінювання по використанню енергії гальмування для опалювання приміщення для підвищення енергоефективності системи.

Ключові слова: енергія гальмування; транзисторний ключ; стаціонарний резистор; теплоаккумулятор; ChatGPT; перенапруга.

Рис.: 5. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Передача рухомого складу з країн Євросоюзу до українських міст призводить до того, що на маршрут виходять трамваї та тролейбуси з істотно різними технічними показниками. Поріг рекуперації для них також виявляється різним, що приводить до виникнення аварійних ситуацій з вагонами, для яких ця характеристика є нижчою. Через те, що рухомий склад належить до вторинного ринку, на нього не поширюються гарантійні зобов'язання та сервісне обслуговування. А запасні частини, які виходять з ладу при такій експлуатації, вже не можливо замовити. Виникає потреба обмеження максимальної напруги на прийнятному для всіх типів вагонів рівні. Це можливо зробити за допомогою інвертора на тяговій підстанції. Проте досі в Україні міський електротранспорт не має повноважень від вищих закладів на віддачу енергії до мережі середньої напруги. Навпаки, така віддача поки що підпадає під штрафні санкції. Прийнятним у такому випадку стає розміщення на тяговій підстанції резистивного обмежувача напруги.

Постановка проблеми. При встановленні резистивного обмежувача напруги спеціалістами ТОВ «Плутон ІС» було вирішено задачу розсіювання зайвої енергії у вигляді тепла. Однак навіть у такій формі використання енергії гальмування є місце засобам енергоефективності, яку й розглянуто у цій роботі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання рекуперативного гальмування в міському електротранспорті неодноразово підіймалося в літературі [1; 2]. Проте через досить великий опір контактної мережі ефективність перетікання енергії гальмування від рухомого складу до підстанції невелика [3]. До того ж у багатьох країнах, у тому числі й в Україні, є пряма заборона на віддачу енергії від підстанції до мережі середньої напруги [4]. Альтернативою інвертуванню енергії в мережу могло б стати використання накопичувачів на підстанції – суперконденсаторів або акумуляторів, які заряджаються при рекуперативному гальмуванні й розряджаються при споживанні на тягу [5; 6]. Однак на заваді стає величезна вартість таких систем, що перешкоджає отриманню економічного ефекту. Встановлення накопичувачів на рухомому складі [7; 8] призводить до зайвого навантаження останнього. Знаходження на лінії рухомого складу з різними показниками як стосовно рекуперації, так і за граничними технічними параметрами вимагає простого та ефективного рішення з коротким часом впровадження. Таким рішенням може стати розсіювання зайвої енергії в блоках резисторів, встановлених на підстанції. Але, на відміну

від гальмівних резисторів, які розташовано на рухомому складі, стаціонарні резистори працюють зі змінною довжиною контактної мережі, тобто потрібна стабілізація напруги на них з урахуванням падіння напруги на лінії.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз публікацій довів, що в сьогоденні бракує інформації щодо роботи стаціонарних резисторів на підстанції для розсіювання зайвої енергії гальмування.

Метою статті є побудова структурної схеми обмежувача напруги зі стаціонарними резисторами на тяговій підстанції міського електротранспорту для ефективного обмеження перенапруг у контактній мережі та запровадження енергоефективного рішення щодо використання енергії гальмування.

Виклад основного матеріалу. Багатьом містам Східної Європи в межах допомоги з Євросоюзу передають рухомий склад, який до того вже працював на європейських лініях [9-11]. Трамваї мають різні характеристики: поріг початку рекуперативного гальмування, поріг увімкнення гальмівних резисторів, максимальну робочу напругу електротехнічного обладнання. У разі, якщо тягова підстанція обладнана інвертором (рис. 1) проблема сумісності різних типів рухомого складу вирішується зниженням уставки інвертування на найнижчий рівень. Однак в умовах сучасної бази нормативів в Україні, Румунії та Польщі немає можливості віддати енергію в мережу середньої напруги через те, що ця подія прирівнюється до непогодженої генерації. Погодити генерацію неможливо [4] через вимогу відповідних установ надати інформацію щодо об'ємів енергії, що генерується, що в умовах різної пасажиронаповненості та неусталеного графіка руху не є можливим.

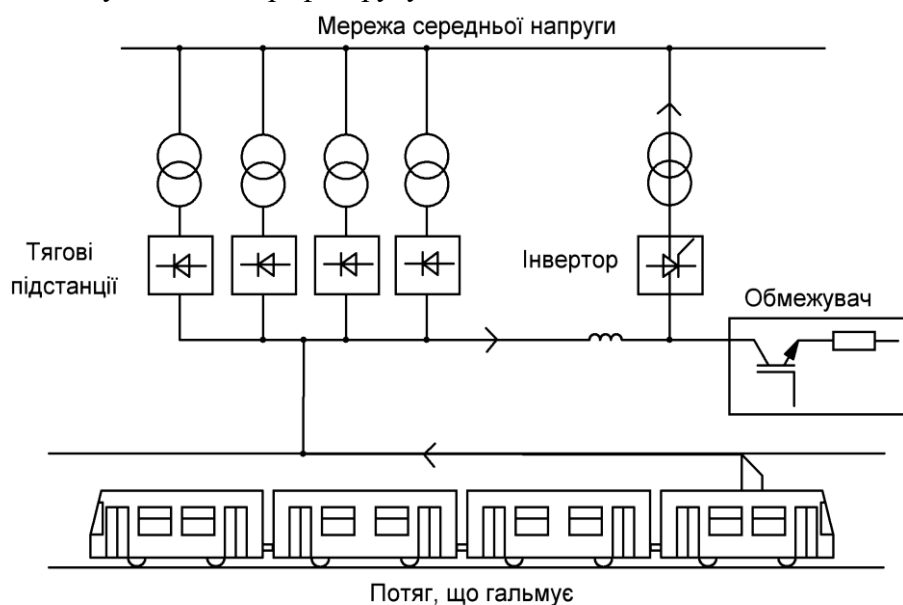


Рис. 1. Організація утилізації енергії гальмування на тяговій підстанції

Джерело: розроблено автором.

У разі, коли в мережі можливі тривалі перенапруги в разі рекуперації рухомих електроенергії за відсутності споживання з мережі (особливо при русі з гори), може знадобитися установка спеціальних пристроїв. На рис. 1 продемонстровано підхід, запропонований автором у ТОВ «Плутон ІС» для вирішення цієї проблеми в міському електротранспорті в місті Орадя (Румунія) та Дніпро (Україна). Замість інвертора на тяговій підстанції встановлюється транзисторний обмежувач напруги – IGBT-чоппер (рис. 2) з блоком резисторів (зворотний діод не показано). У разі коли поїзд, що гальмує, рекуперує енергію, напруга на збірних шинах підвищується. При підвищенні напруги на збірних

шинах вище порогового рівня відкривається транзистор і розсіює енергію гальмування на резисторі. Таке рішення є енергетично невигідним, але при відсутності споживачів енергії або забороні рекуперації в мережу середньої напруги допомагає захистити обладнання. Тобто передусім рішення виконує захисні функції.



Рис. 2. Транзисторний чоппер на випробуваннях у випробувальній лабораторії ТОВ «Плутон ІС»

Джерело: розроблено автором.

Транзисторний ключ може працювати у двох режимах: старт-стопному та стабілізуючому.

Старт-стопний режим є базовим. Коли немає вхідних даних щодо величини спрацювання гальмівних резисторів на рухомому складі, які дозволили б оцінити рівень напруги стабілізації, транзистор вмикається при перевищенні заданого порога та вимикається із затримкою часу після зникнення перенапруг. Таке рішення було використано в м. Орадя, Румунія. На рис. 3 наведено осцилограму роботи обмежувача напруги.

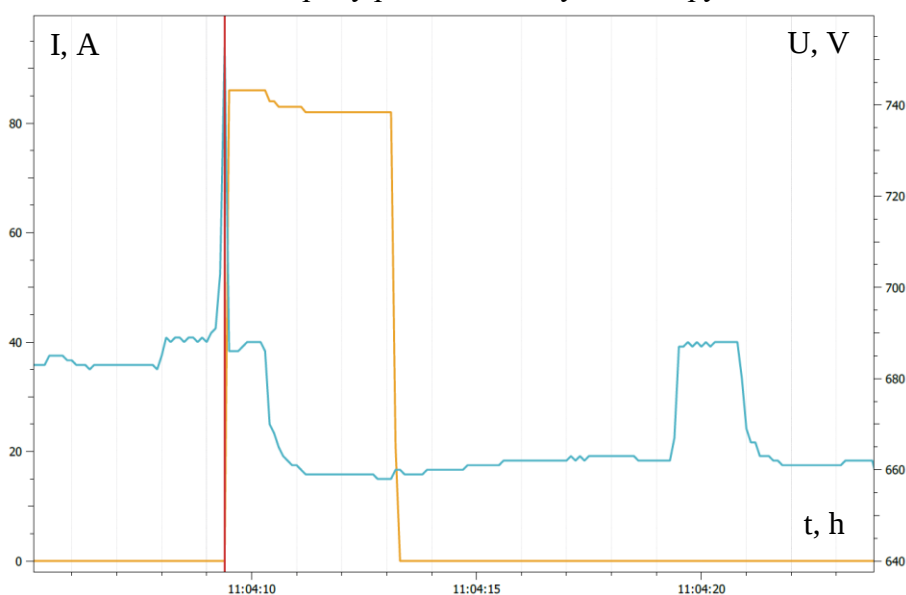


Рис. 3. Осцилограма роботи обмежувача напруги

Джерело: розроблено автором.

Можна бачити, як у момент часу 11.04.09 виникає перенапруга (червоний маркер), спрацьовує обмежувач, скидаючи зайву енергію, напруга зменшується. На осцилограмі жовта крива – струм гасіння, синя – напруга.

Якщо відомі значення по спрацьовуванню гальмівних резисторів на рухомому складі, то можливо організувати стабілізуючий режим роботи обмежувача. Блок резисторів обирається з відомого максимального струму гальмування рухомого складу.

При обговоренні проекту обмежувача напруги для застосування в одному з польських міст (поточний контракт) замовником було висунуто вимогу про утилізацію теплової енергії. Після розрахунків було запроваджено використання теплового акумулятора з гальковим наповненням за аналогією тим, що раніше було розроблено для відновлювальної енергетики [12]. Гальмівні резистори було замінено на теплові електронагрівачі (ТЕНи), які обдуваються примусово повітрям за допомогою вентилятора. Нагріте повітря пропускається через теплоізольовану ємність, яку заповнено галькою (рис. 4). Крізь гальку проходять труби теплообмінника, по яким циркулює вода. Вода відбирає тепло від нагрітої гальки. Нагріта вода використовується для опалення складського приміщення. Тепловий баланс регулюється протоком води. Таким чином, теплоаккумулятор виконує функцію буфера в умовах, коли рекуперація має нерегулярний характер, а її потужність – різною за величиною.

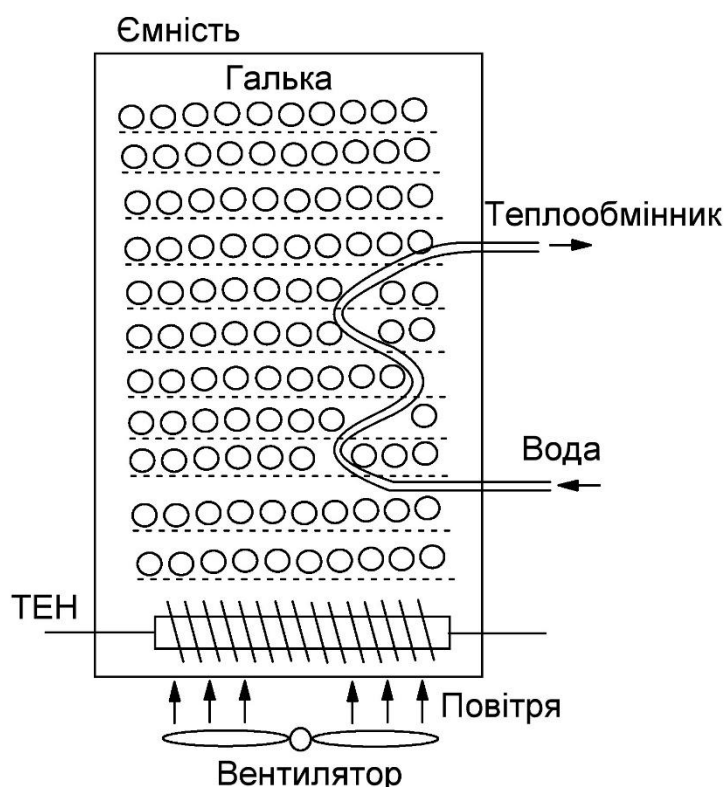


Рис. 4. Принципова схема теплоаккумулятора для утилізації теплової енергії
Джерело: розроблено автором.

На етапі погодження технічного завдання на розробку системи потрібне було якісне оцінювання можливостей такої системи. Для економії часу та для інженерного експерименту було вирішено віддати це завдання на опрацювання ChatGPT. Скріншоти опрацювання запиту наведено на рис. 5.

Значення середньої потужності в 12 кВт було отримано за умовами тягового розрахунку і підтверджено вимірювачами на збірних шинах тягової підстанції.

Таким чином, замовник отримав потенціал використання енергії гальмування для опалення складського приміщення, а дисипативний спосіб боротьби з перенапругами – ефективне використання енергії. Експеримент по долученню до інженерної роботи методів штучного інтелекту було визнано вдалим, і розробку теплового акумулятора було запущено вже з використанням SOLIDWORKS Flow Simulation, у якому проводитиметься детальне моделювання розподілу температур в ємності, уточнюватиметься вага гальки, об'єм ємності, теплоізоляція тощо. Конструкторське опрацювання теплового акумулятора ще триває. Результат його розробки та впровадження на об'єкті виходить за рамки цієї статті.

Допоможі розрахувати тепловий акумулятор. Вхідні дані. Середня потужність тепла 12 кВт. Накопичувач – галька. Гранична температура гальки 500 градусів за Цельсієм. Температура довкілля 40 градусів Цельсія. Ємність для гальки нержавіюча сталь завтовшки 2 мм у формі циліндра. Утеплення мінеральна вата завтовшки 50мм. Який об'єм гальки? Які габарити циліндра? Яка потужність втрат у такому накопичувачі? Яка корисна потужність? Яка протока води потрібна для відведення корисної потужності? Яку площу складського приміщення можливо опалювати таким протоком?

Розрахунок теплового акумулятора на гальці – це комплексна задача, що потребує врахування багатьох факторів. Ось поетапний розрахунок, який допоможе вам визначити основні параметри:

1. Визначення необхідної кількості енергії для накопичення:

Перш за все, потрібно визначити, скільки енергії потрібно накопичувати. Це залежить від того, як довго ви плануєте використовувати накопичену енергію без додаткового нагріву. Наприклад, якщо ви хочете, щоб акумулятор міг віддавати тепло протягом 4 годин без додаткового нагріву, то необхідна кількість енергії становить:

$$\text{Енергія} = \text{Потужність} \times \text{Час} = 12 \text{ кВт} \times 4 \text{ год} = 48 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

2. Розрахунок необхідного об'єму гальки:

- **Теплоємність гальки (с):** Теплоємність гальки залежить від її типу (граніт, кремій тощо), але в середньому можна прийняти $c = 0.84 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$.
- **Щільність гальки (ρ):** Щільність також залежить від типу гальки, але в середньому можна прийняти $\rho = 1500 \text{ кг}/\text{м}^3$.
- **Різниця температур (ΔT):** $\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{amb}} = 500^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C} = 460^\circ\text{C}$.
- **Необхідна маса гальки (m):** Енергія = $m \times c \times \Delta T$. Переведемо енергію в кДж: $48 \text{ кВт}\cdot\text{год} = 48000 \text{ Вт}\cdot\text{год} = 48000 \times 3600 \text{ Дж} = 172800000 \text{ Дж} = 172800 \text{ кДж}$.
 $m = \text{Енергія} / (c \times \Delta T) = 172800 \text{ кДж} / (0.84 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C}) \times 460^\circ\text{C}) \approx 447.37 \text{ кг}$
- **Необхідний об'єм гальки (V):** $V = m / \rho = 447.37 \text{ кг} / 1500 \text{ кг}/\text{м}^3 \approx 0.298 \text{ м}^3$ Округлимо до 0.3 м^3 .

3. Розрахунок габаритів циліндра:

Тепер потрібно визначити розміри циліндра, який міститиме гальку. Найбільш економічним варіантом є циліндр, висота якого дорівнює діаметру ($h = d$). Тоді:

$$V = \pi \times (d/2)^2 \times h = \pi \times (d/2)^2 \times d = \pi \times d^3 / 4$$

$$d = \sqrt[3]{(4V/\pi)} = \sqrt[3]{(4 \times 0.3 \text{ м}^3 / \pi)} \approx 0.72 \text{ м}$$

$$h = d \approx 0.72 \text{ м}$$

Таким чином, габарити циліндра: діаметр $\approx 0.72 \text{ м}$, висота $\approx 0.72 \text{ м}$.

4. Оцінка теплових втрат:

Теплові втрати через ізоляцію можна оцінити, використовуючи тепловий опір ізоляції.

- **Теплопровідність мінеральної вати (λ):** $\lambda \approx 0.04 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$
- **Товщина ізоляції (δ):** $\delta = 50 \text{ мм} = 0.05 \text{ м}$
- **Площа поверхні циліндра (A):** $A = 2\pi r^2 + 2\pi rh = 2\pi(d/2)^2 + 2\pi(d/2)h = 2\pi(0.36 \text{ м}^2) + 2\pi(0.36 \text{ м})(0.72 \text{ м}) \approx 3.26 \text{ м}^2$
- **Тепловий опір ізоляції (R):** $R = \delta / (\lambda \times A) = 0.05 \text{ м} / (0.04 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C}) \times 3.26 \text{ м}^2) \approx 0.38^\circ\text{C}/\text{Вт}$
- **Температурний градієнт (ΔT):** $\Delta T = T_{\text{avg}} - T_{\text{env}} = (500^\circ\text{C} + 40^\circ\text{C})/2 - 40^\circ\text{C} = 270^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C} = 230^\circ\text{C}$
- **Потужність втрат (P_loss):** $P_{\text{loss}} = \Delta T / R = 230^\circ\text{C} / 0.38^\circ\text{C}/\text{Вт} \approx 605 \text{ Вт} \approx 0.605 \text{ кВт}$

5. Корисна потужність:

- **Корисна потужність (P_useful):** В ідеальному випадку, корисна потужність є середня потужність тепла (12 кВт). Але, з урахуванням теплових втрат, реальна корисна потужність може бути дещо меншою, особливо якщо накопичувач тривалий час не поповнюється теплом. Якщо потрібно підтримувати постійну корисну потужність 12 кВт, то теплові втрати повинні компенсуватися постійним підгрівом гальки.
- **Якщо ми говоримо про віддачу накопиченого тепла, то корисна потужність в даний момент часу буде зменшуватися через охолодження гальки. У цьому випадку середню корисну потужність можна оцінити як:** $P_{\text{useful}} = P_{\text{total}} - P_{\text{loss}} = 12 \text{ кВт} - 0.605 \text{ кВт} = 11.395 \text{ кВт}$. Це приблизна оцінка, оскільки втрати будуть змінюватися в залежності від температури гальки.

6. Розрахунок потоку води для відведення корисної потужності:

Для відведення корисної потужності необхідна система теплообміну (наприклад, змійовик з водою всередині гальки).

- **Теплоємність води (c_water):** $c_{\text{water}} = 4.186 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$
- **Різниця температур води (ΔT_water):** Припустимо, що вода на вході має 20°C , а на виході – 60°C . Тоді $\Delta T_{\text{water}} = 60^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 40^\circ\text{C}$.
- **Необхідний масовий потік води (m):** $P_{\text{useful}} = \dot{m} \times c_{\text{water}} \times \Delta T_{\text{water}}$
 $\dot{m} = P_{\text{useful}} / (c_{\text{water}} \times \Delta T_{\text{water}}) = 11.395 \text{ кВт} / (4.186 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C}) \times 40^\circ\text{C}) = 11395 \text{ Вт} / (4186 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C}) \times 40^\circ\text{C}) \approx 0.068 \text{ кг}/\text{с}$
- **Необхідний об'ємний потік води (Q):** $Q = \dot{m} / \rho_{\text{water}}$ (де ρ_{water} – щільність води $\approx 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$)
 $Q = 0.068 \text{ кг}/\text{с} / 1000 \text{ кг}/\text{м}^3 = 0.000068 \text{ м}^3/\text{с} = 0.068 \text{ л}/\text{с} = 4.08 \text{ л}/\text{хв}$

Площа, яку можна опалювати, силь

не залежить від теплоізоляції приміщення, кліматичної зони та необхідної температури в приміщенні. Зробити точну оцінку без цих даних неможливо. Проте, для приблизної оцінки можна використати такі міркування:

- **Типові потреби в опаленні:** Для добре утепленого будинку потрібно близько $50 \text{ Вт}/\text{м}^2$ для опалення в помірному кліматі.
- **Опалювальна площа (A_heating):** $A_{\text{heating}} = P_{\text{useful}} / \text{Потреби}_{\text{в опаленні}} = 11395 \text{ Вт} / 50 \text{ Вт}/\text{м}^2 \approx 227.9 \text{ м}^2$

Таким чином, теоретично, ви могли б опалювати близько 227.9 м^2 добре утепленого приміщення в помірному кліматі.

Підсумок:

- **Об'єм гальки:** $\approx 0.3 \text{ м}^3$
- **Габарити циліндра:** діаметр $\approx 0.72 \text{ м}$, висота $\approx 0.72 \text{ м}$
- **Потужність втрат:** $\approx 0.605 \text{ кВт}$ (за умови середньої температури гальки 270°C)
- **Корисна потужність:** $\approx 11.395 \text{ кВт}$ (за умови відсутності додаткового нагріву та поступового охолодження гальки) або 12 кВт (за умови компенсації втрат постійним підгрівом)
- **Протока води:** $\approx 4.08 \text{ л}/\text{хв}$ (для нагріву води на 40°C)
- **Опалювальна площа:** $\approx 227.9 \text{ м}^2$ (для добре утепленого приміщення)

Рис. 5 Опрацювання запиту ChatGPT

Джерело: розроблено автором з використанням @gpt3_unlim_chatbot.

Після оприлюднення результатів впровадження таких систем ТОВ «Плутон ІС» [13; 14], аналогічні пропозиції з'явилися у фірми АВВ [15] для метрополітену. АВВ наголошують на електричному відведенні енергії гальмування за межі тунелів метро. Тобто перешкоджаючи включенню штатних гальмівних резисторів на потязі, енергію гальмування розсіюють за межами тунелю та підстанції, що добре позначається на ефективності вентиляційних систем метрополітена.

Висновки. У статті проведено побудову структурної схеми обмежувача напруги зі стаціонарними резисторами на тяговій підстанції міського електротранспорту для ефективного обмеження перенапруг у контактній мережі. На перший погляд неефективне рі-

шення має потенціал щодо збільшення енергоефективності в загальній економії при використанні енергії гальмування для опалення приміщення або економії на системах вентиляції в метрополітені. Експеримент з долучення інструментів штучного інтелекту при формуванні технічного замовлення було визнано вдалим.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання текстів.

Під час написання цього матеріалу автор(и) використовували телеграм-бот @gpt3_unlim_chatbot - для демонстрації можливостей штучного інтелекту в науковій та інженерній практиці.

Після використання цього інструменту/сервісу автор переглянув та відредагував зміст за потреби і взяв на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Тарнижевский, М., & Томлянович, Д. (1986). *Проектирование устройств электроснабжения трамвая и троллейбуса*. Транспорт.
2. Drozdowski, Piotr & Duda, Arkadiusz. (2016). Modernised DC traction substation recuperating energy of braking. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20161000017>.
3. Cascetta, F., Cipolletta, G., Delle Femine, A., Quintana 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. Про затвердження Кодексу систем розподілу, Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг № 310 (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text>
5. 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>.
6. Wiecek, Maciej & Lewandowski, Mirosław. (2018). Energy storage system in traction vehicle. *MATEC Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818002008>.
7. Ebadi, R., Sadeghi Yazdankhah, A., 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>.
8. Al-Ezee, H. M., Tennakoon, S., Taylor, I., Schedeicker, D., & Schweickart, J. (2017). An on-board energy storage system for catenary free operation of a tram. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(15), 540–544. <https://doi.org/10.24084/repqj15.386>.
9. *Tramvaiul din oradea se modernizează cu vagoane aduse din berlin și cu tramvaie noi achiziționate cu fonduri europene - mobilitate.eu*. (n.d.). Mobilitate.eu. <https://mobilitate.eu/tramvaiul-oradea-vagoane-modernizate>.
10. *У Запоріжжі на лінію вийшли ще 2 європейських трамваї - Офіційний сайт Запорізької міської ради*. (б. д.). Запорізька міська рада - офіційний веб-сайт. <https://zp.gov.ua/uk/articles/item/3883/u-zaporizhzhii-na-liniyu-vijshli-sche-2-evropejskih-tramvai>.
11. *У Дніпрі на маршрути випустили 5 вживаних трамваїв з Німеччини*. (б. д.). Інформатор Дніпро. <https://dp.informator.ua/uk/u-dnipro-na-marshruti-vipustili-5-vzhivanih-tramvajiv-z-nimechchini>.
12. Okazaki, T., Shirai, Y., & Nakamura, T. (2015). Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage. *Renewable Energy*, 83, 332–338. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.027>.
13. *Проектування, розробка та постачання двоагрегатної модульної тягової підстанції cicero для трамвайної лінії м. орадея*. (б. д.). Головна. <https://pluton.ua/news/design-development-and-supply-of-two-unit-modular-traction-substation-cicero-for-oradea-tram-line>.
14. Стрункін, Г.М. (2025). Застосування пристроїв силової електроніки ISBN 978-617-8139-59-9. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15256472>.

15. ENVILINE™ EDS Energy Dissipation System for DC rail transportation. (n.d.). https://library.e.abb.com/public/ef17a1a91819f976c1257e0c0047951d/ENVILINE_EDS_4116PL857-W1-en_052013.pdf.

References

1. Тарнижевский, М., & Томлянович, Д. (1986). *Проектирование устройств электроснабжения трамвая и троллейбуса*. Транспорт.
2. Drozdowski, Piotr & Duda, Arkadiusz. (2016). Modernised DC traction substation recuperating energy of braking. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20161000017>.
3. Cascetta, F., Cipolletta, G., Delle Femine, A., Quintana 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. Pro zatverdzhennia Kodeksu system rozpodilu, Postanova Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh [On Approval of the Code of Distribution Systems, Resolution of the National Energy and Utilities Regulatory Commission No. 310 (2025) (Ukraine)].
5. 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>.
6. Wiecek, Maciej & Lewandowski, Mirosław. (2018). Energy storage system in traction vehicle. *MATEC Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818002008>.
7. Ebadi, R., Sadeghi Yazdankhah, A., 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>.
8. Al-Ezee, H. M., Tennakoon, S., Taylor, I., Schedecker, D., & Schweickart, J. (2017). An on-board energy storage system for catenary free operation of a tram. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(15), 540–544. <https://doi.org/10.24084/repqj15.386>.
9. Tramvaiul din oradea se modernizează cu vagoane aduse din berlin și cu tramvaie noi achiziționate cu fonduri europene - mobilitate.eu. (n.d.). Mobilitate.eu. <https://mobilitate.eu/tramvaiul-oradea-vagoane-modernizate>.
10. . U Zaporizhzhii na liniu vyshly shche 2 yevropeiskykh tramvai [Two more European trams go on line in Zaporizhzhia]. (n.d.). *Ofitsiyni sait Zaporizkoi miskoi rady* – Official website of Zaporizhzhia City Council. <https://zp.gov.ua/uk/articles/item/3883/u-zaporizhzhii-na-liniyu-vijshli-sche-2-evropejskih-tramvai>.
11. U Dnipro na marshruty vypustyli 5 vzhivanykh tramvaiv z Nimechchyny [In Dnipro, 5 second-hand trams from Germany were put on the road. *Informator Dnipro – Informator Dnipro*. <https://dp.informator.ua/uk/u-dnipro-na-marshruty-vipustili-5-vzhivanih-tramvajiv-z-nimechchini>.
12. Okazaki, T., Shirai, Y., & Nakamura, T. (2015). Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage. *Renewable Energy*, 83, 332–338. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.027>.
13. Proiektuvannia, rozrobka ta postachannia dvoahrehatnoi modulnoi tiahovoi pidstantsii cicero dlia tramvainoi linii m. Oradia [Design, development and delivery of a two-unit modular traction substation cicero for the tram line in Orcadia]. (n.d.). Holovna.
14. Strunkin, H.M. (2025). Zastosuvannia prystroiv sylovoi elektroniky ISBN 978-617-8139-59-9. Zenodo [Applications of power electronics devices ISBN 978-617-8139]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15256472>.
15. ENVILINE™ EDS Energy Dissipation System for DC rail transportation. https://library.e.abb.com/public/ef17a1a91819f976c1257e0c0047951d/ENVILINE_EDS_4116PL857-W1-en_052013.pdf.

Отримано 15.03.2025

Hlib Strunkin

senior researcher of the research laboratory "Industrial Electronics",
Engineering Institute of Zaporizhzhia National University engineer "PlutonIC" LLC.

e-mail: strunkingleb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>. ResearcherID: [LNQ-2155-2024](#)

**VOLTAGE LIMITER FOR URBAN ELECTRIC TRANSPORT TRACTION
SUBSTATIONS**

The article provides information on the current state of the rolling stock of urban electric transport in Eastern Europe. It is shown that, due to available rolling stock with significantly different technical parameters in operation, it is possible for cars with the lowest maximum values of operational parameters to fail due to overvoltages due to braking. Due to the ban by Ukrainian legislation on generation of electricity into the medium-voltage network without coordination of its volumes and due to high cost of accumulators, the only possibility of combating overvoltage remains the dissipative method. With this method, excess braking energy is dissipated on stationary resistors located at the traction substation. Operation of a transistor voltage limiter, which was used in the Oradea and Dnipro urban electric transport, is presented. Oscillograms of its operation are given. The transistor limiter is a chopper that can operate both in the start-stop mode and in the voltage stabilization mode. Using artificial intelligence methods, the assessment of the use of braking energy for heating the premises to increase the energy efficiency of the system was obtained. In this case, irregular braking power is transferred to the energy carrier of the warehouse heating system using the thermal accumulator. The experience of using artificial intelligence tools was generally recognized as satisfactory. Leading companies in the production of electrical equipment for traction substations borrowed the idea and proposed using it to facilitate the ventilation mode of subway tunnels by transferring heat generation outside the substation and tunnels. It was proven that even an inefficient solution at first glance can be used to improve the overall energy efficiency of the system as a whole.

Keywords: braking energy, transistor switch, fixed resistor, heat accumulator, ChatGPT, overvoltage.

Fig.: 5. **References:** 15.