

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ РЕЙКОВОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

В результаті проведеної роботи було проаналізовано декілька методів підвищення ефективності системи тягового електропостачання. Це включає впровадження сучасних енергоефективних технологій, модернізацію існуючих підстанцій, використання високоєфективних конденсаторів та батарей для зберігання рекуперованої енергії, а також оптимізацію процесів гальмування та рушання трамваїв. Запропоновано зміни у графіку руху трамваїв з метою підвищення ефективного використання рекуперованої енергії на підприємстві «Швидкісний трамвай» у м. Кривому Розі. Було розроблено кілька сценаріїв оптимізації графіку руху, які передбачають зменшення часу простою трамваїв, забезпечення більш рівномірного навантаження на систему електропостачання, а також зниження пікових навантажень. Це дозволить не тільки знизити енергоспоживання, але й підвищити надійність та стабільність роботи транспортної системи в цілому.

Результати дослідження демонструють значний потенціал впровадження систем рекуперації енергії, що може сприяти зменшенню експлуатаційних витрат та покращенню екологічної ситуації в місті.

Ключові слова: рекуперативне гальмування, накопичувач, енергія рекуперації електрорухомий склад.

KUKHTA OLEKSANDR
Kryvyi Rih National University

RESEARCH OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MEAT AS AN OBJECT OF PROCESSING IN MEAT COMMINATOR

As a result of the work, several methods of increasing the efficiency of the traction power supply system were analyzed. This includes the introduction of modern energy-efficient technologies, the modernization of existing substations, the use of highly efficient capacitors and batteries for the storage of recovered energy, as well as the optimization of the braking and starting processes of trams. Changes in the schedule of trams are proposed in order to increase the effective use of recovered energy at the "High-speed tram" enterprise in Kryvyi Rih. The traction power supply system consists of nine traction substations, eight sectioning stations, and fourteen points of parallel connection. Trams of the Tatra T3, Tatra T3SU series are operated on the site. The longitudinal track profile is characterized by slopes of up to 13.7%. The unified mass of the tram is 26 tons. When the on-board storage device is installed, recuperative energy is received directly on board, while there are minimal losses in the network, which is a positive point. If an on-board storage device is installed, then part of the starting current of the tram will be used from the tram itself. Several scenarios were developed to optimize the traffic schedule, which provide for the reduction of idle time of trams, ensuring a more uniform load on the power supply system, as well as reducing peak loads. This will allow not only to reduce energy consumption, but also to increase the reliability and stability of the transport system as a whole.

The results of the study demonstrate the significant potential of implementing energy recovery systems, which can help reduce operating costs and improve the environmental situation in the city. In real conditions, during the operation of several trams, which slow down the efficiency of storage storage at the substation and at the feeders, it significantly decreases. Also, this analysis does not take into account the mass and overall parameters and their influence on the operation of the tram, which excludes on-board accommodation altogether

Keywords: regenerative braking, accumulator, recuperation energy electric rolling stock.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Тягові системи стикаються з низкою важливих проблем, які необхідно вирішити. Високі експлуатаційні витрати зумовлені високим споживанням енергії, що призводить до збільшення рахунків за електроенергію. Сучасні системи неефективно використовують функції рекуперації енергії під час гальмування трамвая, що призводить до втрати потенційної енергії, яка могла б бути використана системою.

Також існує проблема нерівномірного завантаження енергосистем. Існуючі графіки руху трамвая створюють пікові навантаження, які знижують загальну ефективність і надійність системи. Це вимагає більш ефективного планування та оптимізації графіка.

Серйозною проблемою залишається неналежне впровадження сучасних енергоефективних технологій. Відсутність сучасних технологій, що дають змогу суттєво покращити процеси зберігання та використання енергії, не дає змоги повністю розкрити потенціал наявних технологічних рішень.

Тому метою даного дослідження є вивчення новітніх методів підвищення ефективності використання рекуперації енергії з метою вибору оптимального методу, який дає змогу знизити експлуатаційні витрати та підвищити ефективність і надійність енергосистеми.

Аналіз досліджень та публікацій

Методи збільшення енергії рекуперації на основі раціональних режимів гальмування ЕРС на сьогодні досить розроблені. Наприклад, для збільшення кількості енергії рекуперації вантажних електровозів в [3] пропонується застосовувати так звану інтенсивну рекуперацію, під якою розуміється гальмування, що забезпечує збільшення згенерованої енергії в порівнянні з традиційною рекуперацією на спуску за рахунок прийняттого збільшення перегінного часу ходу і менших вповільнень при гальмуванні (довшого гальмування). Раціональне уповільнення пропонується вибирати в діапазоні 0,02 ... 0,05 м / с², в порівнянні з традиційним 0,1 ... 0,4, а заявляється автором збільшення рекуперуваної енергії при цьому досягає 50%,

що пояснюється в роботі більш ефективним використанням потенційної енергії поїзда.

Ефективне використання енергії рекуперації вимагає розвитку методів і засобів щодо режимів системи тягового електропостачання (СТЕ). Так на основі імітаційного моделювання в [4] досліджено вплив рекуперації на втрати електроенергії в устаткуванні СТЕ тяги постійного струму. Встановлено, що переатоки енергії рекуперації по тяговій мережі на сусідні міжпідстанційній зоні (МПЗ) призводять до збільшення технічних втрат в середньому на 0,4%. В роботі розрахований рівень оптимальних напружень холостого ходу на шинах тягових підстанцій (ТП), що дозволяє за рахунок перетоків потужності рекуперації на сусідні МПЗ збільшити обсяги рекуперуваної електроенергії на 10,6% і більш ніж в два рази зменшити кількість зривів рекуперативного гальмування. Це в кінцевому підсумку призвело до зниження витрат електроенергії за лічильниками тягових підстанцій на досліджуваній ділянці на 4,8%.

Теоретично, при ідеалізованих умовах рекуперація дозволяє повертати в мережу до 40 ... 50% витраченої енергії [5]. Реально, на сьогодні досягається максимальна економія енергії в вантажному русі 3 ... 12%, а при циклічній тязі - 15 ... 25%, що залежить від профілю колії і параметрів ЕРС.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: ґрунтовне дослідження всіх сучасних методів підвищення ефективності використання енергії рекуперації. Це дослідження спрямоване на аналіз і оцінку різноманітних технічних рішень, які сприяють зменшенню енергоспоживання та підвищенню ефективності енергетичних систем.

Виклад основного матеріалу

Реалізація оптимального (пакетного) графіка ведення трамваїв

З метою оцінки впливу параметрів графіка руху на витрату електроенергії в умовах застосування рекуперативного гальмування розглянемо різні варіанти побудови графіка руху поїздів. Відмінності варіантів між собою будуть полягати в різних величинах міжтрамвайного інтервалу, кількості трамваїв в одному складі. Усі інші фактори при побудові графіка руху зберігаються незмінними для всіх розглянутих варіантів.

У загальному вигляді залежність витрати електроенергії для даної задачі набуває вигляду функції трьох змінних:

$$W = f(n, \tau_1, \tau_2), \tag{1}$$

де n – кількість трамваїв на одній ділянці, шт.;

τ_1 – інтервал між трамваями в пакеті, хв;

τ_2 – інтервал між пакетами, хв.

Для пакетного графіка руху трамваїв обмеження на кількість поїздів в пакеті n пов'язані з кількістю ниток графіка в парному і непарному напрямках. У загальному вигляді кількість трамваїв в пакеті повинно задовольняти подвійному нерівності:

$$n_{\min_{ч(н)}} \leq n_{ч(н)} \leq n_{\max_{ч(н)}}, \tag{2}$$

де $n_{\min_{ч(н)}}$ $n_{\max_{ч(н)}}$ – мінімальне і максимальні границі, які повині задовольняти наступне нерівність при допущеннях тут и далі того, що кількість трамваїв в пакеті в межах одного графіка залишається незмінним:

$$n_{\min_{ч(н)}} \geq 2, \tag{3}$$

$$n_{\max_{ч(н)}} \leq \frac{N_{ч(н)}}{2}, \tag{4}$$

де N – кількість трамваїв в парному і непарному напрямку.

Міжтрамвайний інтервал в пакеті графіка τ_1 повинен задовольняти умовам пропуску трамваїв за сигналами пристроїв сигналізації, централізації та блокування з одного боку, а з іншого боку - максимальному міжтрамвайному інтервалу:

$$\tau_{2\min_{ч(н)}} < \tau_{2ч(н)} \leq \tau_{2\max_{ч(н)}}, \tag{5}$$

де $\tau_{2\min}$ $\tau_{2\max}$ – діапазон зміни інтервалів між пакетами.

Зміна розглянутих інтервалів руху і кількості поїздів в пакетах повинно призводити до зміни тоннокілометрової роботи на ділянці залізниці за добу і має задовольняти в загальному випадку рівності:

$$\sum_{i=1}^{K_{ч(н)}} ((n_{kч(н)} - 1) \cdot \tau_{1k}) + \sum_{j=1}^{K_{ч(н)}-1} (\tau_{2kч(н)j}) = 1440, \tag{6}$$

де $K_{ч(н)}$ – кількість пакетів за добу в парному і не парному напрямку.

З урахуванням нерівності (6), що зв'язує кількість трамваїв в пакеті з міжтрамвайним і нтервалами τ_1 і τ_2 , функція (1) в умовах постійного обсягу перевезень для різних варіантів набирає вигляду функції двох змінних.

Для приватного розглянутого випадку рівності інтервалів і кількості поїздів в пакетах вираз (6) набирає вигляду:

$$(n_{ч(н)} - 1) \cdot \tau_{1ч(н)} k_{ч(н)} + (n_{ч(н)} - 1) \cdot \tau_{2ч(н)} = 1440. \tag{7}$$

Крім представлених умов при розрахунках слід забезпечити інші рівні для варіантів організації графіка руху умови, розглянуті вище, а також обмеження з боку системи тягового електропостачання. До останніх слід віднести рівень мінімальної напруги на струмоприймачі електрорухомого складу U_{\min} , максимальну температуру проводів і тросів контактної підвіски T і коефіцієнт допустимого перевантаження силового обладнання тягових підстанцій $k_{\text{пер}}$

$$\begin{cases} U_{min} \geq U_{min \text{ доп}} \\ T \leq T_{max \text{ доп}} \\ k_{пер} \leq k_{пер \text{ доп}} \end{cases} \quad (8)$$

За умовами завдання необхідно знайти варіант реалізації графіка руху з мінімальним добовим витратою електроенергії $W = f(n, \tau_1, \tau_2)$. Тому цільовою функцією для даної задачі буде функція сумарної витрати електроенергії усьма трамваями в парному і непарному напрямках на ділянці залізниці, що визначається з урахуванням втрат енергії по приєднаннях контактної мережі тягових підстанцій:

$$W = \sum_{i=1}^M W_i \rightarrow \min, \quad (9)$$

де W_i – витрати електроенергії по i -му приєднанню контактної мережі тягової підстанції;

M – кількість приєднань контактної мережі тягових підстанцій на розглянутій ділянці.

З урахуванням прийнятих припущень математична модель оптимізаційної задачі прийме такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} W = \sum_{i=1}^M W_i \rightarrow \min \\ n_{minч(н)} \leq n_{ч(н)} \leq n_{maxч(н)} \\ \tau_{1minч(н)} \leq \tau_{1ч(н)} < \tau_{1maxч(н)} \\ \tau_{2minч(н)} < \tau_{2ч(н)} \leq \tau_{2maxч(н)} \\ (n_{ч(н)} - 1) \cdot \tau_{1ч(н)} k_{ч(н)} + (n_{ч(н)} - 1) \cdot \tau_{2ч(н)} = 1440 \\ U_{min} \geq U_{min \text{ доп}} \\ T \leq T_{max \text{ доп}} \\ k_{пер} \leq k_{пер \text{ доп}} \end{array} \right. \quad (10)$$

Отримання рішення математичної моделі (2.9) в аналітичному вигляді представляється вкрай трудомістким, що пояснюється необхідністю врахування значного масиву вихідної інформації, що характеризує інфраструктуру ділянки залізниці, рухомий склад, який звертається на ділянці, і інші умови. У зв'язку з цим рішенням завдання передують етапи на якому для ділянки залізниці виконуються тягові розрахунки для всіх видів електрорухомого складу. Після проведення тягових розрахунків завдання може бути вирішена на основі представленої моделі (9)

Розглянемо рішення задачі на основі ділянки КП «Швидкісний трамвай» а саме ділянку яку живить тягово підстанція №54, яка характеризується наступними параметрами. Режим живлення контактної мережі - двосторонній, паралельний. Контактна підвіска – М85 + 2МФ-100, рейкове коло - рейки Р65 з міжколійних з'єднаннями. Система тягового електропостачання складається з дев'яти тягових підстанцій, восьми постів секціонування, чотирнадцяти пунктів паралельного з'єднання. На ділянці експлуатуються трамваї серій Tatra T3, Tatra T3SU. Поздовжній профіль колії характеризується наявністю ухилів величиною до 13,7 ‰. Уніфікована маса трамваю в дорівнює 26 т. На даній ділянці розміри руху становлять 100 пар трамваїв на добу. Протяжність ділянки - 4 км. В якості вихідних умов прийнято, неграфіковие зупинки через відмову в роботі пристроїв інфраструктури і рухомого складу відсутні.

При вирішенні задачі проаналізуємо характер зміни значення добової витрати електроенергії як функції двох змінних. Набір варіантів побудови графіка руху обмежимо варіантами з постійним міжтрамвайним інтервалом і різними варіантами пакетного пропуску трамваїв.

Для розглянутого випадку кількість поїздів в пакеті n має задовольняти нерівності (2):

$$2 \leq n \leq 50.$$

Інтервал між поїздами в пакеті $\tau_{1ч(н)}$ повинен задовольняти нерівності (5)

$$3 \leq \tau_{1ч(н)} \leq 15..$$

Інтервал між пакетами $\tau_{2ч(н)}$ повинен задовольняти нерівності (7):

$$15 < \tau_{2ч(н)} \leq 405.$$

Математична модель для даної задачі набуває вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} W = \sum_{i=1}^4 W_i \rightarrow \min \\ 2 \leq n_{ч(н)} \leq 50 \\ 3 \leq \tau_{1ч(н)} < 15 \\ 15 < \tau_{2ч(н)} \leq 405 \\ (n_{ч(н)} - 1) \cdot \tau_{1ч(н)} k_{ч(н)} + (n_{ч(н)} - 1) \cdot \tau_{2ч(н)} = 1440 \\ U_{min} \geq 540 \\ T \leq 100 \\ k_{пер} \leq 1,5 \end{array} \right.$$

Рішення математичної моделі проводиться на основі безлічі варіантів виконання графіків руху. На рисунку 1 представлені фрагменти різних варіантів, що пояснюють порядок їх розгляду.

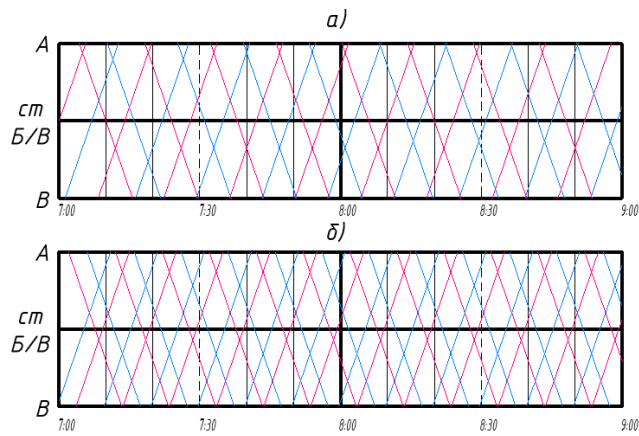


Рис 1 – Варіанти реалізації графіку руху. а) Варіант графіку руху який наданий час виконується; б) запропонований графік для підвищення ефективності рекуперації

Графік а) на рисунку 1, використовується наданий в години пік з 7 до 9 години ранку в цей період інтервал між трамваями складає 6 хв, а між пакетами 8 хв, при цьому інколи виходить так що рекуперована електроенергія нікуди подітися як тільки через т/пс №54 і до іншого фідера. Тому запропоновано зменшити інтервал між трамваями до 4 хв в пакеті, при чому інтервал між пакетами залишити колишнім 8 хв. В результаті ми отримуємо що кількість пакетів за однаковий період не збільшиться, але трамваї в пакеті будуть знаходитися на одному фідері т/пс №54, що дозволить зменшити втрати рекуперованої енергії. Результати розрахунку витрати електроенергії для першого варіанту і другого організації графіку руху занесені до таблиці 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку при різних варіантах графіку руху трамваїв

Варіант	Міжтрамвайний інтервал, хв	Інтервал між пакетами, хв	Витрати електроенергії, кВт·ч
1	6	8	108,8
2	4	8	106,08

Як показують результати розрахунків, для різних варіантів побудови графіка руху розмах значень витрати електроенергії на тягу для розглянутого ділянки шляхом зміни міжтрамвайного інтервалів в умовах пакетної організації пропуску трамваїв досягає 2,5% від загальної витрати електроенергії на тягу зображено на рисунку 2. Дана обставина свідчить про значний потенціал підвищення енергетичної ефективності руху на ділянці. З метою оцінки енергетичної ефективності існуючого нормативного графіка слід порівняти його з варіантом, що має мінімальний витрата електроенергії на тягу з можливих за допомогою запропонованого підходу. Отримана оцінка потенціалу підвищення енергетичної ефективності перевезень свідчить про актуальність питання і необхідності подальшого опрацювання та використання результатів досліджень перевізному процесі.



Рис 2 – Результати витрат при різних інтервалах руху трамваїв в пакеті

Установка випрямно-інверторних перетворювачів

Якщо на трансформаторі постійного струму присутній інвертор, режим напруги в мережі підвищує ефективність передавання рекуперованої енергії в мережу середньої напруги, але його приймання підлягає узгодженню з комерційних і технічних аспектів, таких як: Якщо так, то: - Максимально допустима короточасна потужність, що подається в мережу.

- Гармоніки без спотворень.

- Дозволяє обленерго оплатити повернену потужність.

У джерелах живлення міського електротранспорту ТП нині не оснащені інверторами. Трансформатор постійного струму з ВПП передає надлишкову енергію трамвая назад із тягової мережі (0,6 кВ) у мережу змінного струму (6-10 кВ). Перехід ВПП з режиму випрямляча в режим інвертора починається в разі перевищення напруги на шині ТП значення $0,6 \text{ кВ} + 10\%$.

Селективний запуск є важливим фактором при зміні режиму роботи на інверторній. Виявлення рекуперативного гальмування за частотною кривою струму у фільтрі випрямленої напруги для запобігання усунення потоку енергії, що проходить між ТП, під час розподілу значень напруги на шини суміжних підстанцій можна використовувати принцип [3].

Важливим фактором у підвищенні ефективності роботи інвентарних перетворювачів (ВПП) є швидкість їхнього спрацювання при збільшенні енергії рекуперації на фідерах, що викликає підвищення напруги на шинах тягової підстанції. Важливо, щоб швидкодія ВПП перевищувала швидкість спрацювання реле максимальної напруги на трамваї, яке може перевести його в режим реостатного гальмування. Для ідентифікації стрибків напруги пропонується використовувати показник швидкості зростання напруги на шинах тягової підстанції, який може бути виявлений як залишковий слід від стрибка напруги на струмоприймачі трамвая в фідерній зоні. Для цього необхідно встановити граничні діапазони стрибків напруги на струмоприймачах трамвая з контакторними системами регулювання при скиданні тяги.

Однак, навіть за дотримання вищезазначених умов, ефективність інвентарного перетворювача суттєво залежить від режиму роботи живильної мережі. При низькому навантаженні системи у вузлах приєднань тягової підстанції існують обмеження для передачі надлишкової енергії. Чим далі електрорухомий склад ЕРС, що генерує електроенергію, знаходиться від тягової підстанції, тим більші втрати рекуперованої енергії, які можуть сягати до 40% від загальної кількості [7].

З урахуванням усіх цих факторів та значних економічних витрат (встановлення нових ВПП на підстанції має просту окупність приблизно в 10 років [5]), даний метод є малоефективним з техніко-економічної точки зору.

Установка накопичувальних пристроїв на тягових підстанціях постійного струму

Перспективним і активно досліджуваним шляхом збільшення ефекту використання рекуперованої енергії в системах електрифікованого транспорту незалежно від режиму навантаження зовнішньої енергосистеми є збереження цієї енергії шляхом використання накопичувачів, які крім цього дозволяють достатньо вирівнювати навантаження на тягову мережу. Абстрактно логічні основи використання накопичувачів в тягових енергетичних системах розглядаються в [7]. Дослідженню питань використання накопичувачів в транспортних системах присвячена безліч праць, які варто відмітити [8, 9].

Вже є позитивний досвід використання механічних інерційних накопичувачів, в Західній Європі (м. Лондон, м. Гамбург). Комплекс з 2-5 енергоблоків завдяки яким є можливість акумулювати енергію потужністю 1,5-2,5 МВт, що вистачає енергії для пуск та розгону до швидкості 60-65 км/год двох електропоїздів [7]. Використання надпровідних індуктивних або ємнісних накопичувачів на сьогоднішній день не розповсюджено і вимагає дослідної експлуатації. Альтернативою застосування НЕ в системі електропостачання є встановлення їх безпосередньо на трамваї, що з енергетичної точки зору є найбільш оптимальним [8, 9]. Основною перевагою такого розташування є мінімальні втрати рекуперованої енергії при її передачі до НЕ і ніякого впливу рекуперованої енергії на показники якості електроенергії системи тягового електропостачання. Недоліком є збільшення масо-габаритних характеристик електропоїздів. Для вирішення цього питання де оптимально розташувати накопичувач в тяговій системі потребує відповідного обґрунтування

Основні характеристики накопичувачів енергії, приведені в таблицю 2

Таблиця 2

Основні характеристики накопичувачів енергії

		Питома енергія Дж/кг	Час відавання енергії, с
Зі статистичною активною зоною	Хімічний	10^2-10^5	$1-10^5$
	Індуктивний	1-10	$10^{-3}-10$
	Ємнісний	0.1-0.5	$10^{-6}-10^{-2}$
З динамічною активною зоною	Механічний	$10-10^3$	$1-10^3$
	Електромеханічний	1-10	$10^{-2}-10$
	Електродинамічний	0.05-1	$10^{-3}-10^{-2}$

Для знаходження більш ефективного місця розташування розроблена структурна схема живлення тягової мережі 0,6 кВ з варіантами місцезнаходження накопичувачів рис 3

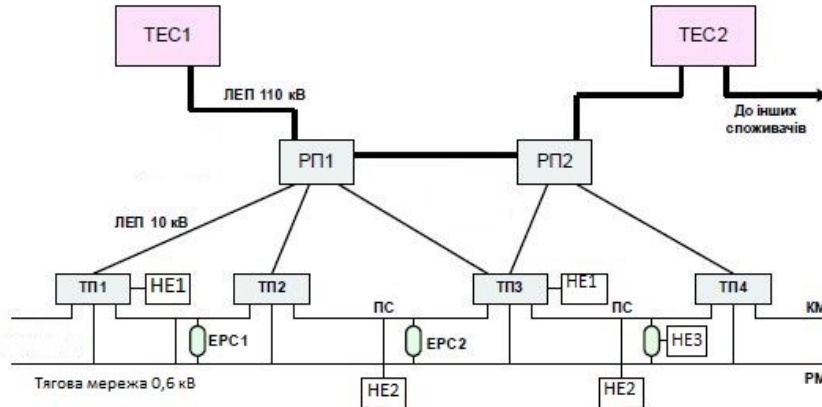


Рис 3 – Структурна схема тягової мережі

При встановленні накопичувача на підстанції (варіант HE1), для прийому рекуперованої енергії енергоємність HE повинна бути 100-200 МДж. Таку енергоємність задовольняти можуть накопичувачі типу інерційні і ємнісні. При встановленні накопичувача в тягову мережу (варіант HE2), а саме в місцях секціонування необхідно щоб енергоємність була такою, щоб вистачило для прийому рекуперованої енергії мінімум з одного трамвая. Для цього використовують інерційні накопичувачі з меншою енергоємністю. При встановленні накопичувача на борту трамвая може бути тільки ємнісний накопичувач або акумуляторна батарея. Основним пріоритетом при роботі ємнісного накопичувача в прийомі рекуперованої енергії. Приблизна енергоємність повинна бути до 12МДж.

Найбільше згладження отримується при встановленні накопичувачі на поїзді, але такий бортовий HE встановити на існуючі вже трамваї в депо складно.

Стационарний HE ніяк не впливають на розповсюдження енергії в тяговому електропостачанні, але дозволяє вирішити питання згладжування для ТП і загальної системи, і головну проблему вирішує, а саме дає можливість при будь-якому варіанті використовувати рекуперативне гальмування.

На даний момент можливі два варіанти установки установок стационарних HE: на тяговій підстанції, чи в зоні секціонування. Для трамваїв, де тягові підстанції, що живлять мережу, сильно прив'язані до станції, в яких відбувається режим гальмування і розгону трамвая, при таких умовах HE необхідно встановити на тяговій підстанції, і енергоємність повинна бути вдвоє більшою за значення енергії, що повертається при гальмуванні трамвая, тому що є можливість прибуття на станцію одночасно двох трамваїв.

Вирішимо питання визначення оптимального варіанту розташування накопичувача в системі тягового електропостачання для КП «Швидкісний трамвай», скористаємось методикою яка наведена в [7].

Варіація розташування в системі тягового електропостачання для КП «Швидкісний трамвай» зображена на рис 4

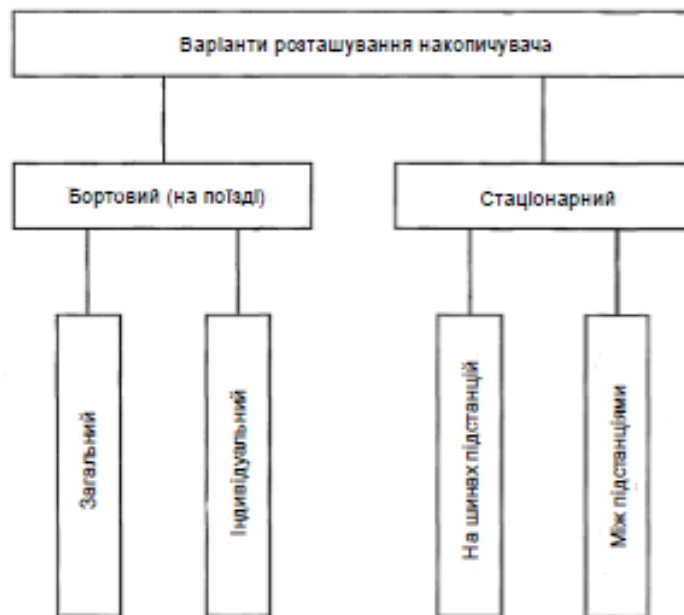


Рис 4 – Варіації розташування накопичувачів в системі тягового електропостачання КП «Швидкісний трамвай»

В [7] проведено порівняльний аналіз для визначення ефективності застосування ємнісного накопичувача відповідно до місця установки в системі тягового електропостачання.

При встановленні ємнісного накопичувача на ТП, вони приймають рекуперовану енергію, а потім повертають в мережу. В результаті зменшується використання електроенергії системою з загальної системи, зменшуються піки навантаження. Також знижуються витрати в загальній мережі понижуючого трансформатора. Додатково при цьому встановлені накопичувача можна зменшувати хвилині, часові, добові графіки споживання електроенергії. В цьому випадку енергоємність повина бути достатньо великою, тому що встановлена в одному місці. Економічний ефект отримується з декількох факторів:

- При зменшенні піків струму;
- повернення до тягової мережі рекуперованої енергії;
- зменшуються капітальні витрати через установку менших потужностей трансформаторів і ЛЕП.

При встановленні на станціях сумарна кількість і встановленої потужності накопичувача потрібно більше, рекуперована енергія накопичується і повертається в цьому випадку минаючи майже тягову мережу, при чому зменшуються витрати енергії в ЛЕП.

При встановленні накопичувача бортового прийом рекуперативної енергії виконується безпосередньо на борту, при цьому відбуваються мінімальні втрати в мережі, що є позитивним моментом. Якщо встановлено бортовий накопичувач, то частина пускового струму трамвая буде використовуватися з самого трамвая.

Щоб оцінити процеси енергобіни в системах тягового електропостачання проведемо теоретичні дослідження, проаналізувавши різні варіації встановлення накопичувача. Скористаємося умовами і вихідними величинами [7]:

1. Напруга в мережу потрапляє від тягової підстанції
2. ККД тягової підстанції 95%;
3. ККД мережі 93%;
4. КДД накопичувача 98%.

Визначимо параметри рекуперативного гальмування трамвая Tatra T3:

1. Маса трамвая з максимальною кількістю пасажирів $m=21$ т;
2. Початков швидкість гальмування $v=60$ км/год;
3. ККД редуктор 95%
4. КДД тягового постійного двигуна;
5. ККД перетворювача 94%
6. Середнє значення зусилля при гальмуванні $F=22$ кН;
7. Середнє значення потужності 155кВт
8. Інерційність обертання маси трамвая 1.1.

За допомогою умов [7] виконаємо розрахунок можливостей використання рекуперативної енергії при різних варіаціях розташування накопичувача.

Розрахуємо енергію, яку зможе повернути трамвай при гальмуванні, за формулою 2.1

$$W_{\text{рек}} = \int_v^0 \frac{\gamma m v}{3600} = \frac{\gamma m v^2}{7200}, \quad (11)$$

$$W_{\text{рек}} = \frac{\gamma m v^2}{7200} = 11,55 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

При врахуванні ККД обладнання тягового, розрахуємо енергію яку зможе відати трамвай в накопичувач при рекуперації:

- при розташування накопичувача на підстанції

$$W_1 = W_{\text{рек}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТД}} \eta_{\text{КЛ}} \eta_{\text{ТМ}} \eta_{\text{ТРР}}, \quad (12)$$

$$P_1 = P_{\text{ср}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТД}} \eta_{\text{КЛ}} \eta_{\text{ТМ}} \eta_{\text{ТРР}}. \quad (13)$$

- при розташування накопичувача на місцях перегону тягових підстанції

$$W_2 = W_{\text{рек}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТД}} \eta_{\text{КЛ}} \eta_{\text{ТМ}}, \quad (14)$$

$$P_2 = P_{\text{ср}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТД}} \eta_{\text{КЛ}} \eta_{\text{ТМ}}. \quad (15)$$

- при розташуванні накопичувача на борту трамвая

$$W_1 = W_{\text{рек}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТД}} \eta_{\text{КЛ}}, \quad (16)$$

$$P_1 = P_{\text{ср}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТД}} \eta_{\text{КЛ}}. \quad (17)$$

Для визначення енергії яка може використовуватися іншим трамваем з урахуванням зберігання енергії рекуперації в накопичувачі, визначимо за виразами:

- при розташування накопичувача на підстанції

$$W_1 = W_{\text{рек}} \eta_{\text{ред}}^2 \eta_{\text{ТД}}^2 \eta_{\text{КЛ}}^2 \eta_{\text{ТМ}}^2 \eta_{\text{ТРР}}^2 \eta_{\text{НЕ}}, \quad (18)$$

$$P_1 = P_{\text{ср}} \eta_{\text{ред}}^2 \eta_{\text{ТД}}^2 \eta_{\text{КЛ}}^2 \eta_{\text{ТМ}}^2 \eta_{\text{ТРР}}^2 \eta_{\text{НЕ}}. \quad (19)$$

- при розташування накопичувача на місцях перегону тягових підстанції

$$W_2 = W_{\text{рек}} \eta_{\text{ред}}^2 \eta_{\text{ТД}}^2 \eta_{\text{КЛ}}^2 \eta_{\text{ТМ}}^2 \eta_{\text{НЕ}}, \quad (20)$$

$$P_2 = P_{\text{ср}} \eta_{\text{ред}}^2 \eta_{\text{ТД}}^2 \eta_{\text{КЛ}}^2 \eta_{\text{ТМ}}^2 \eta_{\text{НЕ}}. \quad (21)$$

- при розташуванні накопичувача на борту трамвая

$$W_1 = W_{\text{рек}} \eta_{\text{ред}}^2 \eta_{\text{ТД}}^2 \eta_{\text{КЛ}}^2 \eta_{\text{НЕ}}, \quad (22)$$

$$P_1 = P_{\text{ср}} \eta_{\text{ред}}^2 \eta_{\text{ТД}}^2 \eta_{\text{КЛ}}^2 \eta_{\text{НЕ}}. \quad (23)$$

Для визначення ефективності використання трамваєм рекуперативної енергії скористаємося формулою 2.14

- при розташуванні накопичувача на підстанції

$$\eta_1 = \frac{W_1}{W_{\text{рек}}} = \frac{P_1}{P_{\text{рек}}}. \quad (24)$$

- при розташуванні накопичувача на місцях перегону тягових підстанцій

$$\eta_2 = \frac{W_2}{W_{\text{рек}}} = \frac{P_2}{P_{\text{рек}}}. \quad (25)$$

- при розташуванні накопичувача на борту трамвая

$$\eta_3 = \frac{W_3}{W_{\text{рек}}} = \frac{P_3}{P_{\text{рек}}}. \quad (26)$$

Розрахунки занесені до таблиці 3

Таблиця 3

Енергія і потужність при зберіганні енергії рекуперації

Місце розташування накопичувача	Енергія кВт·год	Потужність кВт	Ефективність %
На ТП НЕ1	7,13	99	61,6
На фідерній зоні НЕ2	8,1	110	68
Борту НЕ3	9,1	128	79,5

Потрібно пояснити, що приведені розрахунки достовірні при присутності одного трамвая на підстанції. В реальних же умовах при експлуатації декількох трамваїв що гальмують ефективність прийому накопичувачів на підстанції і на фідерах чуттєво зменшується.

Також в даному аналізі не враховуються масо габаритні показники і їх вплив на роботу трамвая, що взагалі виключати бортове розміщення.

Література

1. Гетьман Г. К. Теорія електричної тяги / Г. К. Гетьман. – Дніпро: Акцент ПП, 2014. – 580 с. – (Підручник).
2. Електропостачання електричного транспорту: навч. посіб./В. Х. Далека, В. К. Нем, В. І. Скуріхін; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 168 с.
3. Мокін Б. І., Мокін О. Б. Ідентифікація параметрів моделей та оптимізація режимів системи електропривода трамвая з тяговими електродвигунами електродвигунами постійного струму. Монографія. – Вінниця: Універсум 2008. – 92с.
4. Говоров П.П., Харченко В.Ф., Говоров В.П. Автоматизація керування режимами міських електричних мереж : монографія. ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. 229 с.
5. Саблін, О. І. Підвищення ефективності рекуперації енергії в системі електротранспорту при обмеженому тяговому електроспоживанні / Енергетика та енергозбереження. – 2014. – № 6/1(20). – С. 21-26.
6. Доманський І.В. Основи енергоефективності електричних систем з тяговими навантаженнями : монографія. НТУ «ХП». Харків : вид-во ТОВ «Центр інформації транспорту України», 2016. 224 с.
7. Левковець П.Р., Гедз Ю.М., Канарчук О.В., Кришан Г.Л., Сендак М.Д. Системна ефективність на транспорті. Методи, моделі і стратегії / Під ред. П.Р.Левковця. – К.: НТУ, ІЕБТ, 2002. – 216 с
8. Скалозуб, В.В. Ресурсозберігаючі методи управління тягою поїздів і удосконалення конструкцій рухомого складу: автореф. дис....докт. техн. наук : 05.22.07 / Скалозуб Владислав Васильович; [ДНУЗТ]. – Д.: 2003. – 37
9. Карпушин, Е. І. Визначення експлуатаційних витрат енергії рухомих складом трамвая і тролейбуса з застосуванням нечітких множин при моделюванні руху / Е. І. Карпушин // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Х.: ХарДАЗТ. – 2000. – 2(23). – С. 48-50.

References

1. Hetman G.K. Theory of electric traction / G.K. Hetman - Dnipro: Accent PP, 2014. 580 p. - (Textbook).
2. Electric supply of electric transport: a textbook / V. H. Daleka, V. K. Nem, V. I. Skurikhin; Kharkiv National Academy of Municipal Economy - Kharkiv: KhNAMG, 2012. 168 p.
3. Mokin B. I., Mokin O. B. Identification of model parameters and optimization of modes of the tram electric drive system with traction electric motors by DC motors. Monograph. - Vinnytsia: Universum 2008. - 92 p.
4. Govorov P.P., Kharchenko V.F., Govorov V.P. Automation of control of modes of urban electric networks: monograph. KhNUMG named after A.M. Beketov, 2017. 229 c.
5. Sablin, O. I. Increasing the efficiency of energy recovery in the electric transport system with limited traction power consumption / Energy and Energy Conservation. 2014 - No. 6/1(20) - P. 21-26.
6. Domansky I.V. Fundamentals of energy efficiency of electrical systems with traction loads: monograph. NTU "KHPI". Kharkiv: publishing house of LLC "Transport Information Center of Ukraine", 2016. 224 c.
7. Levkovets P.R., Gedz Y.M., Kanarchuk O.V., Kryshan H.L., Sendak M.D. System efficiency in transport. Methods, Models and Strategies / Edited by P.R. Levkovets - K.: NTU, IEBT, 2002. 216 p.
8. Skalozub, V.V. Resource-saving methods of train traction control and improvement of rolling stock structures: PhD thesis: 05.22.07 / Skalozub Vladyslav Vasylovych; [DNUZT]. - D.: 2003. - 37
9. Karpushyn, E.I. Determination of operational energy consumption by rolling stock of tram and trolleybus using fuzzy sets in traffic modeling / E.I. Karpushyn // Information and control systems on railway transport - Kharkiv: KharDAZT - 2000 - 2(23) - P. 48-50.