

КУХТА ОЛЕКСАНДР

Криворізький національний університет

<https://orcid.org/0009-0006-3356-8040>e-mail: cuxta.s@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМУ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ У СИСТЕМІ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ

У цій роботі надано докладний опис процесу розробки моделі рекуперації для трамваю Tatra T3. На основі цієї моделі було побудовано три імітаційні моделі системи тягового електропостачання, результати яких ретельно проаналізовано та представлені у вигляді графіків. Це дозволило зробити висновки щодо ефективності та перспектив використання енергії рекуперації в даній системі.

Зокрема, було проведено поглиблене дослідження рекуперативного гальмування в системі тягової підстанції, зосереджуючись на його потенціалі для економії енергії в міському електротранспорті. Розроблені імітаційні моделі які описує взаємодію між трамваями, що рухаються на різних ділянках маршруту, та тяговою підстанцією. Модель враховує динаміку руху трамваїв, режими гальмування та рекуперації, а також втрати енергії в системі.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність та ефективність впровадження систем рекуперації енергії у міському електротранспорті, що може суттєво знизити енергоспоживання та сприяти розвитку електротранспорту.

Ключові слова: рекуперація, імітаційна модель, тягова система, гальмування.

KUKHTA OLEKSANDR
Kryvyi Rih National University

MODELING OF REGENERATIVE BRAKING MODE IN THE TRACTION SUBSTATION SYSTEM

This article describes in detail the development of a recovery model for the Tatra T3 tram, which allows the return part of the energy consumed during movement to the power supply system. Based on this model, three simulation models of the traction power supply system were created, the results of which were carefully analyzed. The presented graphical materials demonstrate the efficiency of using regenerative energy. This allowed us to conclude the prospects for introducing regenerative braking to reduce the energy consumption of urban electric transport.

In particular, an in-depth study of regenerative braking in the traction substation system was conducted, which emphasizes its potential for energy saving in an urban environment. The developed simulation models describe the interaction of trams on different sections of the route with the traction substation, including the dynamics of tram movement, braking and regeneration modes, and also consider energy losses in the system.

The models take into account the operating modes of both individual trams and the entire system, which allows us to estimate the potential for energy savings when implementing recovery technologies. The study results confirm the feasibility and effectiveness of integrating energy recovery systems into urban electric transport. This allows to significantly reduce energy consumption, contributes to improving the energy efficiency of transport infrastructure and supports the development of electric transport in the face of growing electricity shortages.

Thus, the study demonstrates significant potential for the use of regenerative braking in urban electric transport, opening up opportunities for further innovation and improving the overall efficiency of electric transport systems. The introduction of such systems has the prospect of not only saving energy but also reducing operating costs, making electric transport more attractive for modern cities.

Key words: recuperation, simulation model, traction system, braking.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

На сьогоднішній день існує значна кількість наукових робіт та статей, які розглядають ефективність використання рекупераційної енергії в електротранспорті. Проте, у більшості з них висвітлені негативні аспекти, які обмежують повне використання потенціалу цієї технології:

- відсутність поїздів на лінії в режимі тяги: Відсутність поїздів на лінії в режимі тяги призводить до утворення надлишкової енергії рекуперації, яка потім не може бути повністю використана.
- нестабільність енергії рекуперації: Цей аспект викликаний різноманітними випадковими факторами, такими як необхідний режим гальмування, робочі режими інших поїздів на лінії, якість систем автоматичного управління рекуперативним гальмуванням тощо.
- недостатня потужність та ефективність тягових механізмів: Наявність застарілих або неефективних тягових механізмів може значно зменшити можливість ефективного використання рекупераційної енергії під час гальмування та зниження швидкості

З метою вирішення вказаних проблем, розглянуто необхідність проведення комплексного дослідження електропостачання та рекупераційної системи в контексті тягової системи муніципального підприємства "Швидкісний трамвай" у місті Кривий Ріг.

Аналіз досліджень та публікацій

Дослідження на тему рекуперативного гальмування є чимало.

У літературі [9] йдеться мова про використання енергоємних конденсаторів в якості додаткових джерел енергії при нерівномірному русі локомотива є більш вигіднішим ніж акумуляторні батареї. Розрахунок показав що оптимальна ємність заряджаемого конденсатора повинна бути в границях від 10-20Ф. Аналіз проводився на базі локомотива ЧМЭЗ-Т, де наданий момент накопичують рекуперовану електроенергію на штатну акумуляторну батарею NKS150. Вона має ряд недоліків: порівняно висока швидкість саморозряду до

14% за місяць, низький ККД, невелика надійність при низьких температурах, кількість циклів заряду і розряду низька 300-500.

У роботі виконано аналіз можливості регулювання напруги на шинах тягових підстанцій для розширення зони рекуперації електротранспорту в умовах обмеженого тягового електроспоживання. З урахуванням існуючих обмежень це дозволить знизити кількість обривів рекуперативного гальмування і витрати електроенергії на тягу поїздів.

В результаті моделювання сталих режимів струморозподілу в системі тягового електропостачання, при наявності рекуперації, встановлена залежність ефективної зони рекуперації від віддалення поїздів в тяговому і рекуперативному режимах, величини і співвідношення їх струмів, а також напруги на шинах тягових підстанцій.

При регулюванні напруги тягових підстанцій для розширення зони рекуперації істотно збільшуються втрати енергії в тяговій мережі, що вимагає комплексної оцінки енергозбереження від застосування рекуперації в умовах підвищених втрат.

У статті [10] описується методика, яка дозволяє розрахувати кількість електроенергії рекуперації в електрифікованому міському транспорті при встановленні ємнісного накопичувача електроенергії на шинах тягової підстанції. Також розроблений алгоритм (блок-схема алгоритму зображена на рисунку 1), виконаний приклад розрахунку де знаходяться чотири поїзди на перегоні, який дозволив встановити, що для заданого режиму руху ставлення електроенергії рекуперації до тяги становить 36,99%, відношення надлишкової електроенергії до тяги - 14,91%, необхідна енергоємність ємнісного накопичувача електроенергії - 384,93 Ф.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: змоделювати модель рекуперативного гальмування у системі тягової підстанції, для подальшого дослідження чи є вигідна рекуперація на конкретному прикладі, а саме на системі тягового електропостачання криворізького міського транспорту КП «Швидкісний трамвай».

Виклад основного матеріалу

Основним елементом розробленої моделі є двигун постійного струму. Існує безліч розробок ДПС, але в даній моделі використовується підсистема, запропонована стандартною бібліотекою Simulink з бібліотеки SimPower Systems з блоками постійного струму.

Порти F+ і F- використовуються для подачі напруги збудження для створення магнітного потоку в машині. Порти A+ і A- використовуються для підключення обмоток якоря до блоку живлення. Активне навантаження двигуна подається через віртуальний вхід TL. Вихідні параметри двигуна: частота обертання ω , струм обмотки якоря I_A , струм збудження I_f і електромагнітний момент T_e формуються на мультишині m . Щоб отримати доступ до вихідних параметрів, необхідно використовувати демультіплексор на чотири виходи і з'єднати його вхід з точкою t . тоді на першому (верхньому) виході діє частота обертання, на другому - струм обмотки якоря, на третьому - струм збудження і на четвертому - електромагнітний момент двигуна. [24]

Параметри двигуна вводяться через діалогове вікно (графічний інтерфейс), яке відкривається при подвійному клацанні по зображенню рушія на схемі моделі.

R_a - активний опір ланцюга якоря, що включає опір обмотки якоря, опір щітково-колекторного вузла і активний опір обмотки додаткових полюсів. Величина сумарного опору якорного ланцюга, якщо немає даних наближено визначається за формулою

$$R_a = 0,5(1 - \eta_n) \frac{U_H}{I_H} \quad (1)$$

L_a - індуктивність розсіювання ланцюга обмотки якоря, що включає індуктивність розсіювання обмотки якоря і індуктивне опір обмотки додаткових полюсів. Якщо немає даних, індуктивність розсіювання якорного ланцюга двигуна може бути обчислена за наближеною формулою 2.2

$$L_a = \gamma \frac{U_H}{p\omega_n I_H} \quad (2)$$

де U_H - номінальна напруга обмотки якоря двигуна,

I_H - номінальний струм обмотки якоря, ω_n - номінальна частота обертання якоря, p - число пар полюсів двигуна,

γ - коефіцієнт, $\gamma = 0,6$ - для некомпенсованих машин, $\gamma = 0,25$ - для компенсованих машин;

R_f - активний опір обмотки збудження двигуна;

L_f - індуктивність обмотки збудження двигуна. Можна визначити по кривій намагнічування ланцюга збудження при відомому значенні числа витків котушки полюса W_B як

$$L_f = 2pW_B^2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta(I\Phi)_H} \quad (3)$$

L_{af} - взаємна індуктивність обмоток збудження і обмотки якоря двигуна. Визначається взаємна індуктивність по номінальним параметрам двигуна, як

$$L_{af} = \frac{K_E}{I_f} = \frac{U_H - R_a I_{AH}}{\omega_n I_f} = \frac{U_H - R_a I_{AH}}{\omega_n \frac{U_H}{R_f}} \quad (4)$$

де K_E - постійна ЕРС двигуна, так як

$$E = K_E \omega \quad (5)$$

E - противоерс двигуна,

U_H - номінальна напруга збудження;

J - приведений до валу двигуна момент інерції, що включає момент інерції двигуна і момент інерції виробничого механізму;

Розглянемо структуру моделі двигуна, відкривши файл Fig1_01 правою кнопкою миші, орієнтуючи курсор на зображенні двигуна.

Вибираємо команду Lock Under Mask і розкриваємо структуру моделі двигателя.

Структура включає датчик струму обмотки якоря Ia і датчик струму обмотки збудження iF. Елементи iA, iF, Ra, La, Fcem (керований джерело напруги), Rf, Lf входять до складу бібліотеки SimPowerSystems. Всі інші блоки структури (рис. 10) реалізовані на елементах, що входять в бібліотеку Simulink. Розкриємо блок механіки Model Continuous TL input подвійним клацанням ми-ші (рис. 11). Блок механіки виконує моделювання моменту і швидкості.

Блок з Voltage constant KE реалізує коефіцієнт по ЕРС $KE = L_{af}I_f$. При введенні параметрів двигуна в зазначених у діалоговому вікні (рис. 1.2) коефіцієнти по ЕРС і моменту дорівнюватимуть:

$$K_E = K_T. \tag{6}$$

Тому перший блок множення формує електромагнітний момент двигуна[24]

$$T_a = L_{af}I_f I_a = K_m I_a, \tag{7}$$

а другий блок множення - противоєрс двигуна

$$E = L_{af} I_f \omega = K_e \omega \tag{8}$$

Частота обертання виходить шляхом інтегрування рівняння руху електроприводу

$$T_E - T_L - T_f - B_m \cdot \omega = J \frac{d\omega}{dt} \tag{9}$$

Блок мультиплексора Мих об'єднує вихідні змінні двигуна: частоту обертання ω , струм обмотки якоря (двигуна) Ia, струм обмотки збудження If і електромагнітний момент двигуна в одну шину m. Це зроблено для спрощення віртуального зображення двигуна в SimPowerSystems.

Для створення моменту на валу двигуна використовується блок Signal Builde. Блок Signal Builder дозволяє створювати взаємозамінні групи кусоч-но-лінійних джерел сигналів і використовувати їх в моделі

Діалогове вікно блоку Signal Builder дозволяє визначати форми сигналів, що виводяться блоком.

Можна вказати будь-яку форму хвилі, яка є кусочно-лінійної.

Після розробки моделі і перевірки на адекватність, модель має вигляд рис 1.

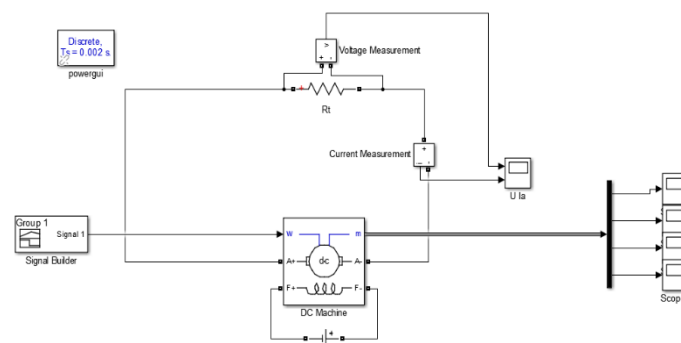


Рис 1 Модель тягового двигуна TE-022

Блок powergui дозволяє вибрати один з наступних методів для вирішення схеми:

- Безперервний, який використовує вирішувач зі змінним кроком від Simulink
- Дискретність електричної системи для вирішення з фіксованими тимчасовими кроками
- Векторне рішення

Блок powergui також відкриває інструменти для стаціонарного аналізу і аналізу результатів моделювання, а також для розширеного проектування параметрів.

Потрібен блок powergui для імітації будь-якої моделі Simulink, що містить блоки спеціалізованих енергосистем Simscape Electrical. Він зберігає еквівалентну схему Simulink, яка представляє рівняння простору станів моделі.

Блок powergui відключається під час поновлення моделі. Щоб забезпечити правильне виконання моделі, які не відновлюють бібліотечну посилання для блоку powergui.

Ви можете використовувати кілька блоків Powergui в системі, яка містить дві або більше незалежних електричних ланцюгів, які ви хочете змоделювати з різними вирішувачі Powergui. Наприклад, ця система моделює верхню електричний ланцюг в дискретному режимі і нижню ланцюг в безперервному режимі. Мета полягає в тому, щоб порівняти продуктивність моделювання двох методів.

Для цього потрібно помістити кожен ланцюг в окрему підсистему, а потім додати блок powergui всередині кожної підсистеми.

Також в моделі використовується два вимірювальних блоки current measurement, voltage measurement

Блок вимірювання струму використовується для вимірювання миттєвого струму, що протікає в будь-якому електричному блоці або сполучної лінії. Вихід забезпечує сигнал Simulink, який може використовуватися іншими блоками Simulink в даній моделі сигнал поступає блок осцилографа.

Блок вимірювання напруги вимірює миттєве значення напруга між двома електричними вузлами.

Вихід надає сигнал Simulink, який може використовуватися іншими блоками Simulink в даній моделі сигнал поступає блок осцилографа.

Осцилограф блок (Scope) будує графіки досліджуваних сигналів в функції часу. Дозволяє спостерігати за змінами сигналів в процесі моделювання

Для реалізації моделі тягової системи було використано такі блоки: DC Voltage Source, Controlled Current Source, Series R branch.

Блок джерела постійної напруги (DC Voltage Source) забезпечує ідеальне джерело постійної напруги. Позитивний термінал представлений знаком плюс на одному порту. В моделі цей блок відіграє роль тягової підстанції 54

Блок керованого джерела струму (Controlled Current Source) перетворює вхідний сигнал Simulink ® в еквівалентний джерело струму. Генерований струм управляється вхідним сигналом блоку. Напрямок позитивного струму показано стрілкою на значку блоку.

Блок послідовного опору (Series R branch) виконує роль втрат в лініях тягової системи і в трамваї.

Побудування імітаційних моделей моделі системи тягового електропостачання

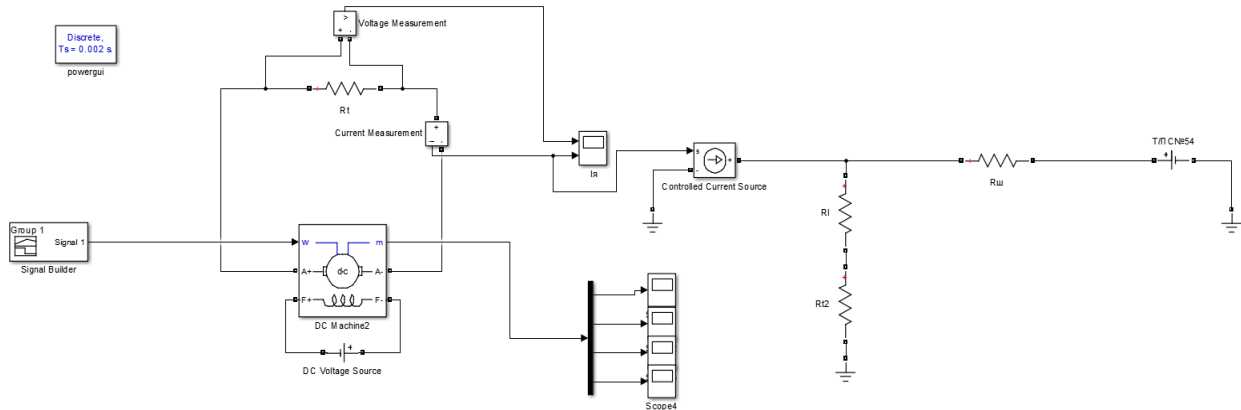


Рис. 2 Перший варіант тягової системи

Перша модель тягової системи описує ситуацію коли перший трамвай зупиняється на станції, а інший прямує позаду першого знаходячись на одному фідері тягової підстанції. Перший зупиняючись використовує рекупераційне гальмування до повної зупинки, і віддає енергію рекуперації у тягову систему де вона протікає по фідеру до трамвая який споживає цю енергію.

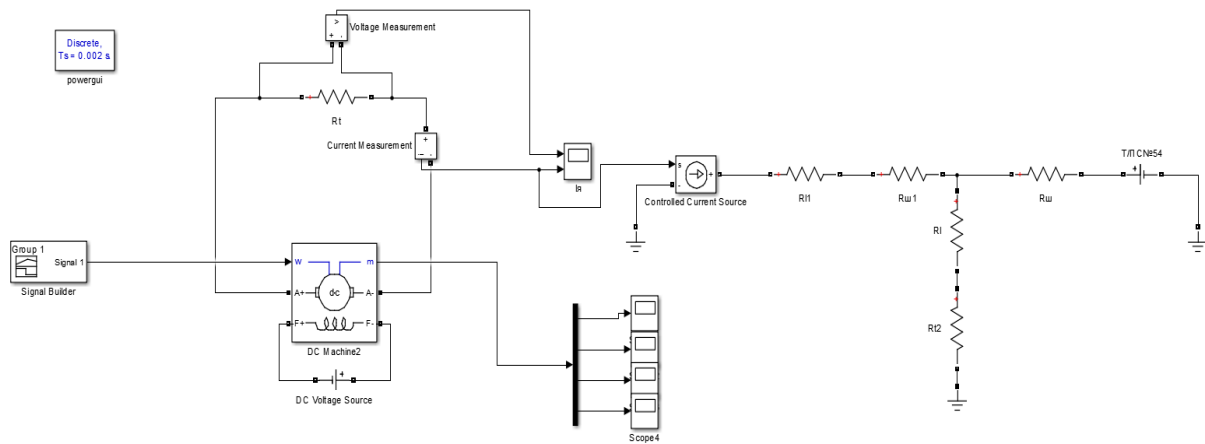


Рис. 3 Другий варіант тягової системи

Друга модель тягової системи описує ситуацію коли трамвай пригальмовує виїжджаючи з тунелю, а другий трамвай рухається на іншому фідері тягової підстанції. Трамвай при гальмуванні віддає енергію в систему, яка споживається другим через два фідери і шини тягової підстанції.

Третя модель описує ситуацію коли перший трамвай пригальмовує для скидання швидкості при виїзді з тунелю, другий гальмує під'їжджаючи до станції повністю гальмує а третій рухається. Всі три трамваї знаходяться на різних фідерах.

У таблиці 1 наведено еквівалентний опір фідерів, шин трамваю.

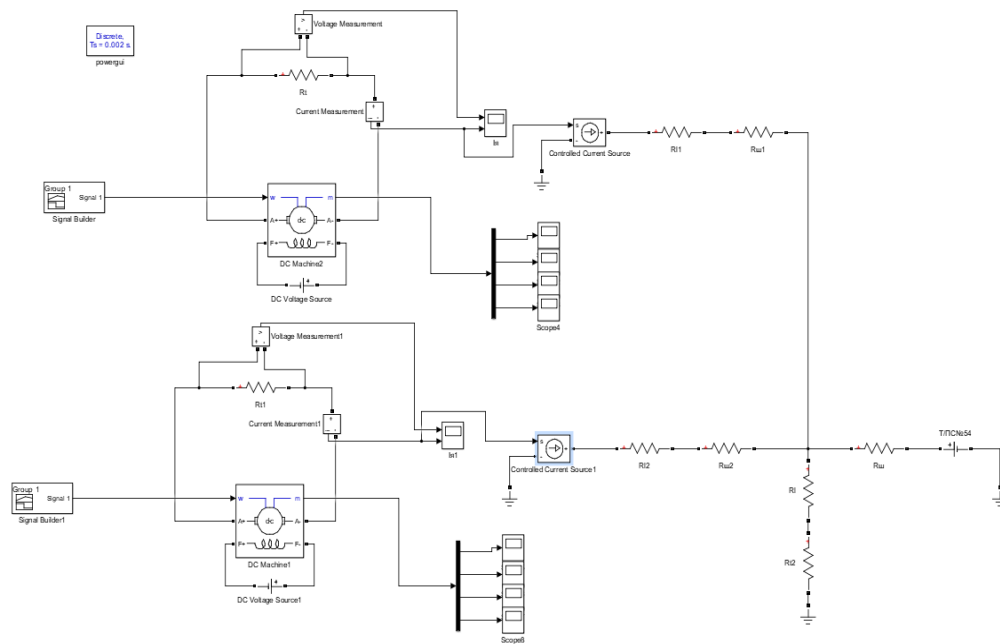


Рис. 4 Третій варіант тягової системи

Таблиця 1

Еквівалентні опори тягової системи

	R, Ом
Опір фідера	0.355
Опір шин	0.180
Опір трамваю без двигунів	0.5
Опір трамваю з двигунами	2

Для дослідження рекуперативної енергії було проведено 20 дослідів з різною початковою швидкістю гальмування і різною масою рухомого складу. Пара результатів дослідів зображені на рисунках 5 6

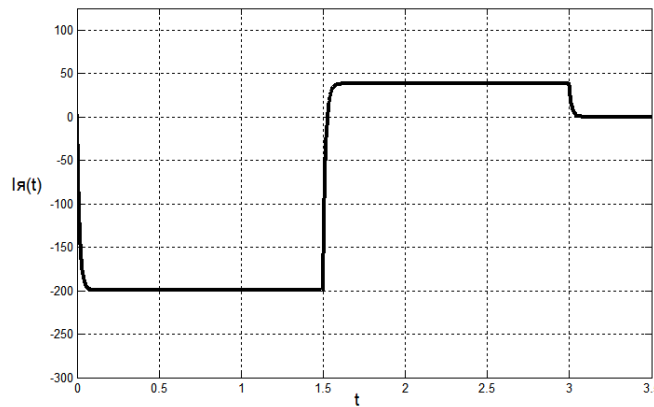


Рис. 5 Дослід 5 рекуперативної енергії

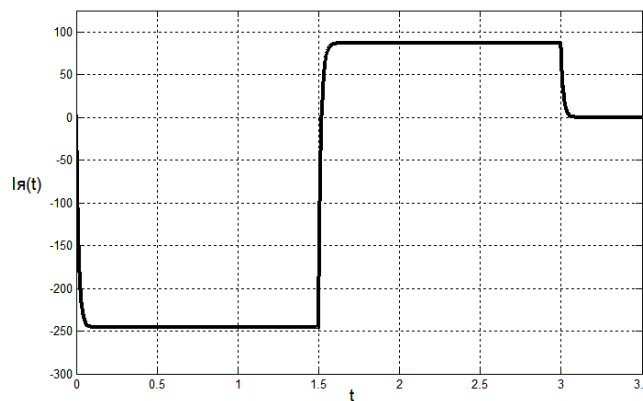


Рис. 6 Дослід 18 рекуперативної енергії

Данні досліджень занесені в таблицю 2.

Таблиця 2

Номер досліду	Швидкість, км/год	Маса, т	Кінетична енергія, Дж	Рекуперативний струм, А
1	15	20	2250	11,91772101
2	15	25	2812,5	21,66858365
3	20	20	4000	29,79430252
4	20	25	5000	33,04459006
5	25	20	6250	35,75316302
6	25	25	7812,5	42,25373811
7	30	20	9000	47,12916943
8	30	25	11250	48,75431321
9	35	20	12250	50,92117157
10	35	25	15312,5	53,08802994
11	40	20	16000	54,17145912
12	40	25	20000	57,42174667
13	45	20	20250	59,58860503
14	45	25	25312,5	65,00575094
15	50	20	25000	67,7143239
16	50	25	31250	75,84004277
17	55	20	30250	81,25718868
18	55	25	37812,5	88,4800499
19	60	20	36000	95,25148229
20	60	25	45000	102,0229147

Дані систематизовано у графіку на рисунку 7



Рис. 7 Графік рекуперативного струму і кінетичної енергії

Як видно з рис 7 чим більша кінетична енергія тим більший рекуперативний струм

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У цій роботі змодельовано модель рекуперативного гальмування у системі тягової підстанції, зокрема на системі тягового електропостачання криворізького міського транспорту КП «Швидкісний трамвай».

Дослідження зосереджене на аналізі ефективності та перспективності використання енергії рекуперації, що базується на кінетичній енергії трамваїв, які експлуатуються на маршрутах КП «Швидкісний трамвай». Модель враховує динаміку руху трамваїв, режими гальмування та рекуперації, а також втрати енергії в системі.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на детальний аналіз вигідності впровадження рекуперативних систем на конкретному прикладі, а саме в системі тягового електропостачання криворізького міського транспорту. Це включає розрахунок економії енергії, зниження експлуатаційних витрат та підвищення загальної ефективності системи. Аналіз конкретних умов експлуатації та профілів руху трамваїв у Кривому Розі дозволить оцінити потенціал використання рекуперативного гальмування для зменшення

енергоспоживання та покращення екологічної ситуації в місті.

Таким чином, результати моделювання можуть стати основою для прийняття обґрунтованих рішень щодо впровадження технологій рекуперативного гальмування в міському електротранспорті, що сприятиме підвищенню енергоефективності та сталого розвитку міської інфраструктури.

Література

1. Фізична модель рекуперативної системи маневрового тепловоза: Монографія / ред. Ю.В.Черняк, Ю.В. Прилепський, І.В. Грицук. Донецьк: ДонІЗТ, 2010. 196 с.
2. Варакин А. И. Маневровый и универсальный локомотив с гибридной силовой установкой и накопителем энергии на базе электрохимических конденсаторов / А. И. Варакин, А. Н. Варакин, В. В. Менухов. // Наука и техника транспорта. – 2007. – №2. – С. 24–28.
3. Устенюк О. В. Використання накопичувачів енергії для підвищення параметрів локомотивів. / О. В. Устенюк, О. В. Пасько. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. / Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика» науково-виробничого журналу. – 2012. – №3. – С. 293–296
4. Модернізація маневрового тепловоза ЧМЭЗТ з метою зменшення витрати палива і значного зниження викидів шкідливих речовин. / О. С.Бірюков, А. П. Фалендиш, М. В. Володарець, І. В. Золотухін. // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2011. – №126. – С. 157–160.
5. Писарев Л. Т. Рекуперативное торможение поездов с использованием импульсных энергоемких конденсаторов. / Л. Т. Писарев, Ю. В. Черняк. // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2009. – №17. – С. 97–106.
6. Колб А. А. Аккумуляция энергии рекуперации электрифицированного транспорта с помощью емкостных энергонакопителей. / А. А. Колб. // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту.. – 2010. – №2. – С. 89–94.

References

1. Physical model of the recuperative system of a shunting locomotive: Monograph / edited by Y.V. Chernyak, Y.V. Prilepsky, I.V. Hrytsuk. Donetsk: DonIZT, 2010. 196 p.
2. Varakin A.I. Shunting and universal locomotive with a hybrid power plant and energy storage based on electrochemical capacitors / A.I. Varakin, A.N. Varakin, V.V. Menukhov // Science and Technology of Transport. 2007 - No. 2 - pp. 24-28.
3. Ustenok O. V. The use of energy storage devices to increase the parameters of locomotives. Theory and practice" of the scientific and production journal. - 2012. - No. 3. - P. 293-296.
4. Modernization of shunting diesel locomotive ChME3T in order to reduce fuel consumption and significantly reduce emissions of harmful substances. / O. S. Biryukov, A. P. Falendysh, M. V. Volodarets, I. V. Zolotukhin // Collection of scientific works of UkrDAZT. - 2011. - №126. - P. 157-160.
5. Pisarev L. T. Regenerative braking of trains using pulsed energy-intensive capacitors. // Collection of scientific papers of DonIZT. - 2009. - No. 17. - P. 97-106.
6. Kolb A.A. Accumulation of energy recovery of electrified transport using capacitive energy storage devices. Bulletin of the Dnipropetrovs'k National University of Railway Transport... - 2010. - No. 2. - P. 89-94.