

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»  
Факультет енергетики та інформаційних технологій  
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

## ДИПЛОМНА РОБОТА

на тему:

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**Виконав:**

здобувач вищої освіти денної форми  
навчання освітнього ступеня «Магістр»,  
освітньо-професійної програми  
«Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка» спеціальності 141  
«Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

\_\_\_\_\_ **Микола КУКРИЦЬКИЙ**

**Керівник:** кандидат технічних наук, доцент

\_\_\_\_\_ **Павло ПОТАПСЬКИЙ**

**Оцінка захисту:**

Національна шкала \_\_\_\_\_

Кількість балів \_\_\_\_\_ Шкала ECTS \_\_\_\_\_

**Допускається до захисту:**

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

Керівник проектної групи  
(гарант освітньої програми)

«Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»

кандидат технічних наук, доцент \_\_\_\_\_ **Ігор ГАРАСИМЧУК**

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                                                     | 9  |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ КП<br>«КИЇВСЬКИЙ МЕТРОПОЛІТЕН».....                                            | 11 |
| 1.1 Вимоги до систем забезпечення метрополітену електричною енергією ..                                                        | 13 |
| 1.2 Опис мереж зовнішнього електропостачання .....                                                                             | 16 |
| 1.3 Класифікація та загальна характеристика електроприймачів.....                                                              | 20 |
| 1.4 Загальні завдання з енергозбереження в електрифікованому транспорті.                                                       | 24 |
| Висновки до розділу .....                                                                                                      | 27 |
| РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ УПРАВЛІННЯ<br>ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ЕЛЕКТРИФІКОВАНОГО ТРАСПОРТУ .....                          | 29 |
| 2.1 Аналіз ефективного застосування систем рекуперації електрифікованого<br>транспорту .....                                   | 29 |
| 2.1.1 Постановка задачі по організації впровадження систем рекуперації<br>електричної енергії.....                             | 29 |
| 2.1.2 Загальні питання формування систем рекуперації .....                                                                     | 33 |
| 2.1.3 Аналіз існуючих методів щодо визначення параметрів ємнісного накопи<br>чувача енергії.....                               | 37 |
| 2.1.4 Порівняльна характеристика потенціалу використання рекуперативної<br>енергії в різних типах електричного транспорту..... | 40 |
| 2.1.5 Дослідження впливу режимів живлячої мережі .....                                                                         | 42 |
| 2.1.6 Дослідження кількісних і якісних показників ефективності рекуперації<br>енергії.....                                     | 45 |
| 2.1.7 Метод оцінки потенціалу енергозбереження в системах електротранс<br>порту .....                                          | 47 |
| 2.2 Використання низькопотенціальної теплової енергії в умовах<br>метрополітену.....                                           | 52 |
| 2.2.1 Досвід інших країн у впровадженні систем перетворення<br>низькопотенціальної теплоти .....                               | 53 |

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.2 Оцінка роботи обладнання та ризику його роботи під час тривалого терміну експлуатації .....                          | 56 |
| 2.2.3 Системи кондиціонування та опалення на зворотному циклі Брайтона                                                     | 59 |
| 2.3 Дослідження можливості використання повітряних потоків в тунелі метрополітені.....                                     | 62 |
| 2.3.1 Оцінка впливу наземного вітрового генератора на оточуюче середовище                                                  |    |
| 2.3.2 Аналіз можливості впровадження вітроелектро генератору в умовах підземного тунелю .....                              | 63 |
| 2.3.3 Дослідження аеродинамічних характеристик вітрового потоку при проходженні рухомого складу в тунелі .....             | 65 |
| Висновки до розділу .....                                                                                                  | 68 |
| РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХОДІВ З ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ЕЛЕКТРИФІКОВАНОМУ ТРАНСПОРТІ .....            | 70 |
| 3.1 Питання енергоефективності шляхом впровадження систем рекуперації енергії.....                                         | 70 |
| 3.1.1 Результати досліджень з визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача методом мінімальної окупності..... | 70 |
| 3.1.2 Результати досліджень потенціалу використання енергії рекуперації в метрополітені.....                               | 84 |
| 3.2 Технічні рішення з покращенням енергоефективності за допомогою тепло-вентиляційних установок в метрополітені.....      | 86 |
| 3.2.1 Схемні рішення використання теплоти повітря в тунелях метрополітену                                                  |    |
| 3.2.2 Дослідження ефективності використання тепло-вентиляційних установок в умовах тунелю метрополітену .....              | 90 |
| 3.3 Отримані результати при розробці вирішення оптимізації енергоспоживання шляхом встановлення ВЕУ в тунелі .....         | 94 |
| 3.3.1 Аналіз конструктивних особливостей та вибір обладнання ВЕУ в умовах тунелю метрополітену.....                        | 94 |

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.2 Розрахунок величини потужності ВЕУ в тунелі .....       | 97  |
| Висновки до розділу .....                                     | 100 |
| РОЗДІЛ 4. СТАРТАП ПРОЕКТ .....                                | 102 |
| 4.1 Опис ідеї проекту .....                                   | 102 |
| 4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту ..... | 105 |
| ВИСНОВКИ .....                                                | 106 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                             | 107 |

## ВСТУП

Метрополітен, метро (франц. Métropolitain, буквально - столичний, від грец. Metrópolis - головне місто, столиця), міська позавулична залізниця для масових швидкісних перевезень пасажирів. Метро відрізняється великою пропускною здатністю, регулярністю і високою експлуатаційною швидкістю руху поїздів. Лінії метро можуть бути підземними (в тунелях), наземними і надземними (на естакадах). Розрізняють закритий спосіб будівництва за допомогою тунелепрохідних щитів і відкритий, при якому тунелі і станції будуються в котлованах і після засипаються ґрунтом. Метрополітен забезпечує значну частину пасажирських перевезень сучасних міст.

Закритий спосіб застосовується при будівництві ліній глибокого і мілкового закладення. При цьому всі роботи з будівництва метрополітену ведуть в підземних умовах, без порушення вуличного руху. Відкритий спосіб застосовують при спорудженні ліній метрополітену мілкового закладення (що проходять на глибині 10-15 м від поверхні землі), при цьому всі роботи зі зведення тунельних конструкцій виконують у відкритих котлованах, які після завершення будівництва засипають ґрунтом[1].

Як вид транспорту з величезною провізної здатністю метрополітени мають потужний структурний вплив на місто в цілому. Вони є тим каркасом, навколо якого ведеться житлове будівництво, активізується економічна і соціокультурна діяльність, концентруються інші види міського пасажирського транспорту. У цьому сенсі метрополітени дійсно грають провідну роль при інтеграції транспортної, містобудівної та соціальної політики, що проводиться в містах[2].

**Мета роботи.** Метою роботи є розвиток підходів щодо енергоефективного управління споживанням електричною енергією різними підходами щодо енергоефективності та застосування відновлювальних джерел енергії в метрополітені.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Аналіз показників ефективності використання енергії рекуперації в електрифікованому міському транспорті – метрополітені. Дослідження впливу режимів систем зовнішнього електропостачання на ефективність передачі енергії рекуперації в первинну живлячу мережу. Розробка практичних рекомендацій з підвищення ефективності використання енергії рекуперації.

2. На основі аналізу традиційних схем теплопостачання та вентиляції станцій метрополітену, стандартної структури їх технологічного обладнання, а також параметрів і обсягів теплових викидів запропонувати нове схемне рішення для системи теплопостачання підземних споруд метрополітену з використанням повітряних теплонасосних установок. Провести оптимізацію параметрів зворотного циклу Брайтона з урахуванням обмежень пов'язаних з температурними і режимами вологості основної тунельної вентиляції станцій метрополітену.

3. Обґрунтувати доцільність побудови та обрати варіанти конструктивного виконання вітрогенератора, який буде встановлений в тунелі метрополітену, визначивши вітровий потенціал через статистичні дані швидкості вітру.

**Об'єкт досліджень** – режими споживання електричної енергії підземним електрифікованим транспортом.

**Предмет досліджень** – методи та засоби управління електроспоживанням електрифікованого транспорту.

**Публікації.** Микола КУКРИЦЬКИЙ / Системи кондиціонування та опалення на зворотному циклі Брайтона// III Всеукраїнська студентська науково-практична конференція «Ефективне використання енергії: стан і перспективи» (09 листопада 2023 року) / Заклад вищої освіти «Подільський державний університет». Кам'янець – Подільський. 2023.

## ВИСНОВКИ

В результаті досліджень, проведених в магістерській роботі проаналізовано перспективні методи енергозбереження методом ефективного накопичення та використання енергії рекуперації, заміна електричного опалення на теплонасосні установки для економії витрат на електроенергію, розглянуто використання вітрової енергетики від повітряних потоків в умовах тунелю. Застосування таких енергозберігаючих технологій дозволить заощадити значну кількість витрат на електричну енергію. Роблячи висновок із розрахунків можна сказати, що кожна із запропонованих концепцій тою чи іншою мірою дозволяє регулювати електроспоживання в системі. Але, як наприклад, з системою накопичення рекуперації, наразі ці показники мають не високі значення. Технічний прогрес не стоїть на місці, а тому в майбутньому запропоновані підходи стануть невід'ємною частиною електричної системи електрифікованого транспорту.

Опалення та вентиляція – являє собою одну з основних систем підземного електрифікованого транспорту. Не можна представити роботу метрополітену без якісного постачання тепла та свіжого повітря. Обладнання, яке забезпечує ці функції потребує значних капіталовкладень, а тому замінюється не часто. В дисертації пропонується використати тепло, яке вентиляційне обладнання виводить на поверхню, для забезпечення балансованого клімату в підземних приміщеннях. Таке тепло буде джерелом низькопотенціального тепла для теплонасосних установок, і дозволить отримати 72%-ва економію енергії в опалювальний період і 15%-ва економію енергії в період охолодження (кондиціонування).

Вітрові генератори в метрополітені мають перспективу використання лиш у тому випадку, коли ця технологія буде більш технологічно розвиненою та більш доступною в запровадженні. Наразі такі системи являють собою не дешеве джерело відновлювальної енергії, а невеликі габарити в умовах тунелю не можуть забезпечити високу ефективність такої установки.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Метрополітени світу: Кращі з кращih! [Електронний ресурс] // – 2023.  
– Режим доступу до ресурсу: <https://www.railway.supply/uk/metropoliteni-svitu-krashhi-z-krashhih/>.
2. Київський метрополітен. [Електронний ресурс] // – 2023. – Режим до  
ступу до ресурсу: <https://www.yakaboo.ua/ua/kiivs-kij-metropoliten.html>.
3. Будівництво транспортних тунелів і метрополітенів: підруч. для сту  
дентів, які навчаються за спец. «Мости і транспортні тунелі» / А. В. Більче  
нко. Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-т. — Харків, 2012. — 183 с.
4. Метрополітен // Термінологічний словник-довідник з будівництва та  
архітектури / Р. А. Шмиг, В. М. Боярчук, І. М. Добрянський, В. М. Барабаш ;  
за заг. ред. Р. А. Шмига. — Львів, 2010. — С. 123. — ISBN 978-966-7407-83-4.
5. Сайт СП «Вагоноремонтний завод» КП «Київський метрополітен».  
URL: <http://www.metro.kiev.ua/node/697/>.
6. Федоренко Д. С. Системи розподілу електричної енергії в мережі  
метрополітену : 05.14.02:141 / Федоренко Дмитро Сергійович – Київ, 2019. –  
104 с. / НТУУ «КПІ» ім.І.Сікорського». баклавр.
7. Енергетика тягових мереж: монографія / В. Г. Сиченко, В. Г. Кузнецов,  
Д. О. Босий, О. І. Саблін ; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. В. Г. Сиченка. –  
Дніпро : Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. – 210 с.
8. Саблін О. І. Розвиток методів і засобів підвищення ефективності  
використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту: автореф.  
дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.09  
"електротранспорт" / Саблін Олег Ігорович – Дніпро, 2019. – 41 с.
9. Дослідження енергоефективності модернізованого поїзда  
метрополітену виробництва ПАТ «КВБЗ» / Донченко А. В., Мужичук С. О.,

Сулим А. О., Хозя П. О., Мельник О. О. // Рейковий рухомий склад. 2015. Вип. 12. С. 48–56.

10. СП «Вагоноремонтний завод» КП «Київський метрополітен». URL: <http://smida.gov.ua/>.

11. Фомін О. В. Визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену / О. В. Фомін, А. О. Сулим, П. О. Хозя. // Производственно-технологические системы: на заметку энергетика. – 2018. – №2. – С. 45–55.

12. Донченко А. В. Аналіз питань енергозбереження та енергоефективності під час експлуатації рухомого складу метрополітену / А. В. Донченко, А. О. Сулим. // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2016, № 3 (63). – 2016. – С. 107–118.

13. Реклама у київському метрополітені - презентація [Електронний ресурс] // Elmedia Ltd.. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.myshared.ru/slide/61356/>.

14. Саблін О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 6, № 8 (72). С. 9–13. doi: 10.15587/1729-4061.2014.30483

15. Донченко А. В. Дослідження енергоефективності модернізованого поїзда метрополітену / А. В. Донченко, С. О. Мужичук, А. О. Сулим. // Збірник наукових праць ДП "УкрНДІВ. – 2015. – С. 48–56.

16. Aspekty efektywności i energooszczędności w procesie modernizacji układów zasilania trakcji tramwajowej / Szeląg A., Maciolek T., Drózek Z., Patoka M. // Pojazdy szynowe. Kwartalnik naukowo-techniczny poświęcony zagadnieniom konstrukcji, budowy i badań taboru szynowego. 2011. Issue 3. P. 34–42.

17. Рябов Є. С. Визначення параметрів накопичувача енергії для електрорухомого складу з асинхронним тяговим приводом у режимі обмеження струму тягової мережі // Вісник Національного технічного

університету «Харківський політехнічний інститут». 2015. № 6 (1115). С. 132–137.

18. Ciccarelli F., Iannuzzi D., Tricoli P. Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2012. Vol. 24. P. 36–49. doi: 10.1016/j.trc.2012.02.001

19. Правила улаштування електроустановок : [арх. 15 березня 2020] / Міненерговугілля України. — Київ : [б. в.], 2017. — 617 с.

20. ДСТУ 3569-97 Енергозбереження нетрадиційні та поновлювані джерела енергії. Основні положення (ГОСТ 30514-97). Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=25862](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25862).

21. An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems / Yang X., Chen A., Li X., Ning B., Tang T. // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2015. Vol. 57. P. 13–29. doi: 10.1016/j.trc.2015.05.002

22. Волох П.В., Цоколенко М.П., Ревенко Л.В., Грічаненко В.А. та ін. Довідникова книга з електроенергетики : Навчальний посібник – К.: Аграрна освіта, 2014. – 506 с.

23. Безродний М. К. Енергетична ефективність системи вентиляції з використанням рекуператора та теплового насосу / М. К. Безродний, М. А. Галан. // «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика». – 2011. – С. 5–13.

24. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник / І. В. Жежеленко, А. К. Шидловський, Г. Г. Півняк, Ю. Л. Саєнко.-Д, Нац. гірнич. ун-т, 2009.-319 с.

25. Новітні енергетичні технології та їх вплив на функціонування систем енергопостачання: аналіт. доп. / О. М. Суходоля. – Київ : НІСД, 2022. – 36 с.

26. ДНАОП 0.00-1-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – К.: Укрархбудінформ, 2001. – 117 с.
27. Проектування електропостачання та електрообладнання машин і установок геотехнічних виробництв: Навчальний посібник для курсового та дипломного проектування [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Уклад.: І. С. Рябенко, О. В. Мейта. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 244 с.
28. Шкрабець Ф.П. Електропостачання: навч. посіб. / Ф.П.Шкрабець; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 540 с.
29. Бурбело, М. Й. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків : навчальний посібник / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 204 с.
30. Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0,38 – 150 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних втрат електроенергії. (ГНД 34. 09. 104 – 2003). – К. : Міністерство палива та енергетики України, 2004. – 115 с.
31. Бурбело М. Й. Стимулювання зменшення втрат в електричних мережах : монографія / М. Й. Бурбело, Л. М. Мельничук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2008. – 110 с.
32. Сиворакша В.Ю., Марков В.Л., Петров Б.Є. та інші. Теплові розрахунки геліосистем. – Дніпропетровськ: Вид-во ДГУ, 2003. – 132 с.
33. Б.Х Драганов, В.В.Іщенко, О.В.Шеліманова. Експлуатація теплоенергетичних установок і систем. К.:Аграрна освіта. 2009.-230 с
34. Енергозбереження. Посібник для загальноосвітньої школи, Львів: Праховник А.В., Мельникова О.В., Конеченков А.Є., Іншеков Є.М., Дешко В.І. / Політра Друку, 2003, - 92 с.

35. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводами. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч1.

36. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч2.

37. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: Навчальний посібник /Барало О.В., Самойленко П.Г., Гранат С.Є., Ковальов В.О. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 557 с.

38. Електричне освітлення та опромінення: навч. посіб. для студентів вищ. навч. закл. / Р.В. Кушлик, В. Ф. Яковлев, Ю. М. Куценко, М. Л. Лисиченко, М. П. Кунденко, Ю. М. Федюшко, – Х: ТОВ «Планетапрінт», 2016. - 332 с.

39. Булгар В.В. Теорія електроприводу: збірник задач. / ОНПУ Одеса: Поліграф, 2006 – 408 с.

40. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода.-К.: Кондор, 2005.-408с.

41. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічні посилання. Загальні положення та правила складання. Режим доступу: chrome extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://kubg.edu.ua/images/stories/podii/2017/06\_21\_posylannia/dstu\_8302.pdf. – Назва з екрана.

42. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки Структура і правила оформлення ДСТУ 3008-2015. Режим доступу: [https://science.kname.edu.ua/images/dok/derzhstandart\\_3008\\_2015.pdf](https://science.kname.edu.ua/images/dok/derzhstandart_3008_2015.pdf). – Назва з екрана.

43. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці: Підручник.-Л.:Афіша, 2002.-320 с.

44. Електробезпека: Підручник / С. В. Панченко, О. І. Акімов, М. М. Бабаєв та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2018. – 295 с.

45. Основи безпечної експлуатації електроустановок: Підручник / С. В. Панченко, О. І. Акімов, М. М. Бабаєв та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2021. – 149 с.

46. Методичні рекомендації щодо виконання та оформлення кваліфікаційної роботи магістра / Т.Д.Гуцол, Л.М.Михайлова, І.Д.Гарасимчук, В.М.Дубік, О.В.Ткач, П.В.Потапський. (За загальною редакцією Михайлової Л. М.) – ПДАТУ, 2019. – 30 с.

47. Система дистанційного навчання Moodle 2.7. – «ЗВО «ПДУ»». Режим доступу: <http://pdatu.net.ua/>. – Назва з екрана.