

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний університет
Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

на тему Аналіз можливості підвищення енергоефективності міського
електротранспорту

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1412-1

Павловський Є.А.

(прізвище та ініціали) (підпис)

спеціальності

141 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

141.00.11 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва)

Керівник

Артемчук В.В.

(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя
2023 рік

Запорізький національний університет

Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

(повне найменування вищого навчального закладу)

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

(повна назва кафедри)

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

Спеціалізація

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма 141.00.11 Електроенергетика,
електротехніка

(шифр і назва)

та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., доц.



В.Л. Коваленко

“ 07 ” грудня 2023 року

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

Павловський Євген Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема магістерської роботи Аналіз можливості підвищення енергоефективності
міського електротранспорту

керівник магістерської роботи

Артемчук В.В.

затвержені наказом вищого навчального закладу від «01» 05 2023 року № 639-с

2. Строк подання студентом магістерської роботи

01 грудня 2023 року

3. Вихідні дані роботи

Напруга живлення – 0,6 кВ;

середній тариф за 1 кВт·год електроенергії – поточний; рухомий склад міського
електротранспорту; тягові підстанції системи енергопостачання

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які рекомендується розробити):




Вступ. 1) Аналіз поточного стану системи енергопостачання міського
електротранспорту 2) Аналіз втрат в тягових мережах

3) Розробка заходів щодо підвищення енергоефективності міського електричного
транспорту 4) Техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів

5) Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (пропонується): Аналіз споживання електроенергії
міськтранспортном; аналіз споживання енергоресурсів обладнанням газового

6. Консультанти розділів дипломної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Артемчук В.В., професор		
Розділ 2	Артемчук В.В., професор		
Розділ 3	Артемчук В.В., професор		
Нормоконтроль	Бандуренко І.І., асистент		

7. Дата видачі завдання

01.06.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітка
1	Поточний стан системи енергопостачання міського електричного транспорту	18.09.2023	
2	Втрати в тягових мережах	10.10.2023	
3	Заходи підвищення енергоефективності міського електротранспорту	10.11.2023	

Студент



(підпис)

Павловський С.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник дипломної роботи



(підпис)

Артемчук В.В.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтролер



(підпис)

Бандуренко І.І.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В дослідженні магістерської роботи були ретельно проаналізовані фактори, що впливають на рівень енергоефективності операцій міського електротранспорту, зокрема ті, які визначають витрати енергоресурсів. Детально розглянуті основні напрямки для підвищення енергоефективності електроспоживання в системі міського електротранспорту. Здійснено аналіз втрат, що відбуваються на різних ланках тягової мережі, і вивчено можливі стратегії для оптимізації енергоспоживання міського транспорту.

Ключові слова: електрична енергія, енергозаощадження, тягова підстанція, електротранспорт, рекуперація, енергоспоживання

ANNOTATION

In the study of the master's thesis, the factors affecting the level of energy efficiency of urban electric transport operations were carefully analyzed, in particular those that determine the consumption of energy resources. The main directions for increasing the energy efficiency of electricity consumption in the urban electric transport system are considered in detail. An analysis of the losses occurring on various links of the traction network was carried out, and possible strategies for optimizing the energy consumption of urban transport were studied.

Key words: electric energy, energy saving, traction substation, electric transport, recuperation, energy consumption

ЗМІСТ

Вступ	6
1 ПОТОЧНИЙ СТАН СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ	8
1.1 Фактори, що впливають на енергоефективність електричного транспорту	17
1.2 Технічний стан пристроїв міського електротранспорту	18
2 ВТРАТИ В ТЯГОВИХ МЕРЕЖАХ.....	21
2.1 Втрати енергії у трансформаторах.....	22
2.2 Втрати енергії у контактній мережі	33
2.3 Параметри контактної мережі	51
3 ЗАХОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ	59
3.1 Підвищення енергоефективності міського ЕРС	59
3.2 Техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів	65
ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76
ДОДАТКИ.....	80

ВСТУП

Міський електричний транспорт, особливо у великих містах, відіграє значущу роль у забезпеченні пасажирських перевезень. Слід відзначити, що електротранспорт є екологічно чистим і має перспективи для якісного та кількісного зростання. До міського електротранспорту можна віднести тролейбуси, трамваї, метро, а також міські електропоїзди та електробуси (з автономним рухом).

Однак міський транспорт постійно стикається з різноманітними проблемами, які стосуються як фінансового складу, так і технічної сфери. Фінансова складова в основному визначається недостатнім фінансуванням, оскільки собівартість проїзду перевищує вартість квитка, і держава часто не компенсує витрати на перевезення пасажирів зі зниженими тарифами. Крім того, існує потреба в заміні застарілого рухомого складу та систем енергопостачання тощо.

Системи електропостачання транспортних систем, враховуючи вимоги, умови роботи, використовуване обладнання та пристрої, суттєво відрізняються від систем електропостачання промислових підприємств. Все це визначає особливості роботи, проектування та методів розрахунку таких систем, які отримують електричну енергію від зовнішніх енергосистем.

Електрична енергія, отримана від генераторів електростанцій, передається через електричні підстанції, лінії електропередачі різної напруги та тягові підстанції. На тягових підстанціях електрична енергія перетворюється з одного виду струму і напруги до іншого, який використовується в рухомому складі, і подається до них через тягову мережу.

У енергосистемах, враховуючи зростання протяжності електрифікованих ліній та збільшення виробництва електроенергії, збільшуються втрати потужності ΔP , які становлять 10...15 % від сумарної потужності енергосистеми. Втрати активної потужності ΔP викликають втрати електроенергії ΔW в мережі. Втрати відбуваються у всіх ланках електричної системи: генераторах,

трансформаторах, лініях електропередачі та інших.

Втрати енергії ΔW призводять до додаткових витрат енергоносіїв, що зростає собівартість електроенергії і, відповідно, знижує економічну ефективність енергосистеми. Ці обставини пояснюють, наскільки важливо вміти правильно розраховувати втрати в мережі і вживати заходів до їхнього раціонального зниження.

У представлений роботі розглянуті шляхи підвищення енергоефективності енергосистеми електротранспорту. Врахування розроблених заходів дозволить зменшити витрати електроенергії і відповідно збільшити ефективність роботи міського транспорту. На підставі нормативних документів [1–3] було обрано напрямки даної роботи.

Об'єкт дослідження – процеси в системі енергопостачання міського електротранспорту.

Предмет дослідження – система енергопостачання міського електротранспорту.

1 ПОТОЧНИЙ СТАН СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Міський електричний транспорт, очевидно, відіграє вирішальну роль у пасажирських перевезеннях у містах. З нашого погляду, міста, де вже існують тролейбуси та трамваї, ймовірно, будуть продовжувати їх використовувати, а нові міські маршрути будуть забезпечуватися за рахунок використання електробусів (рис. 1.1). Тим більше, що в даному напрямку спостерігається активний розвиток через його великі перспективи.



а)



б)



в)

- Рисунок 1.1 – Сучасні електробуси різних виробників:
- а) Urbino 12 electric, компанія Solaris Bus & Coach S.A. (Польща);
 - б) VDL Citea SLF-120 Electric, компанія VDL Bus & Coach bv (Нідерланди);
 - в) E-Bus S18, компанія Sileo GmbH (Німеччина-Туреччина);

Згідно з літературними джерелами, у транспортній галузі міський електротранспорт забезпечує 12,8 % від усіх перевезень, що здійснюються транспортною галуззю (рис. 1.2). Однак у великих містах, особливо тих, де діє метрополітен, частка перевезень міським електротранспортом зростає до 60 % [4...7].

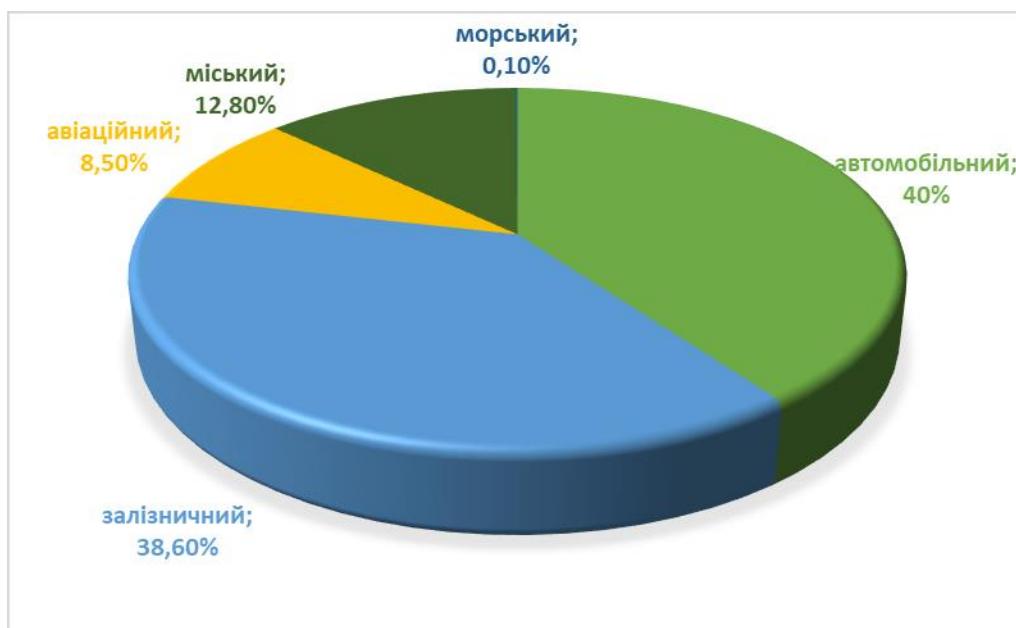


Рисунок 1.2 – Пасажирообіг у транспортній галузі України

Окрім зазначених вище екологічних переваг електротранспорту перед іншими видами транспорту, існує також надзвичайно важлива енергетична складова. Так, ККД електричного двигуна може сягати 98%, тоді як жоден двигун внутрішнього згорання не досягає навіть 50%. Іншими словами, індекс економічної енергоефективності (відношення витрат паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) до одиниці роботи) електротранспорту значно вищий, ніж у автотранспорту (в 1-8...2,2 рази) [6...9]. За даними [7], цей індекс для електричного транспорту становить 2,7...4,8, що є досить високим. Також слід враховувати, що у перспективі частка електроенергії, отриманої з

відновлювальних джерел, буде тільки зростати, а отже, індекс економічної енергоефективності буде ще більший.

Ще одним цікавим фактором, що надає певні переваги електротранспорту із зовнішнім джерелом енергії (тролейбуси, трамваї, міські електропоїзди, метро), є можливість отримувати необхідну додаткову енергію від джерела живлення (тягові підстанції), у той час як двигун внутрішнього згоряння обмежений власною потужністю. Це особливо актуально, коли, наприклад, транспортний засіб рухається вгору або у часи пік, перевантажений, а тим більше, коли він йде повністю завантажений вгору по схилу. Такий режим є шкідливим для тягових двигунів, але для відносно невеликого часу (до години) може бути прийнятним. Даний фактор є суттєвим для великих міст та/або з пагорбами, наприклад, для Києва.

Аналіз характеру енергоспоживання міського електричного транспорту.

Характерною особливістю споживання енергії рухомих складом, як правило, є суттєва різниця від споживачів стаціонарної електроенергетики. На рисунку 1.3 представлено графік споживання потужності транспортних засобів.

Електроспоживання міського електричного транспорту характеризується значною нерівномірністю і циклічністю в часі. Часто, через короткі відстані між зупинками практично відсутні усталені режими електроспоживання, і рекуперація при цьому переважно використовується з метою зупинкового гальмування. Часова діаграма електроспоживання троллейбусів з рекуперацією енергії в залежності від швидкісного руху представлена на рисунку 1.4.

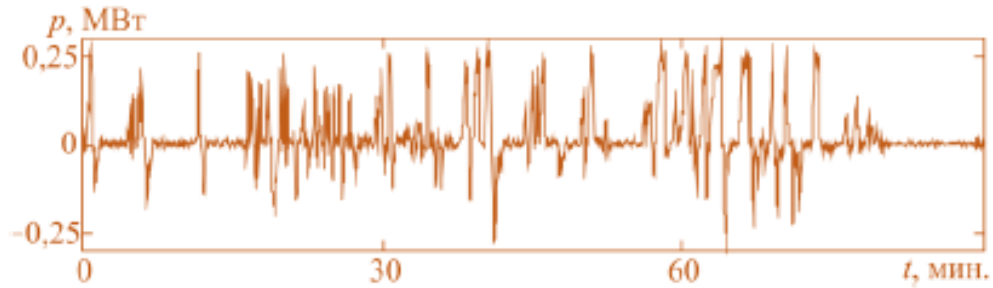
Нерівномірний циклічний графік навантаження можна охарактеризувати наступними показниками [2]:

- Максимальна і мінімальна потужність, споживана від джерела:

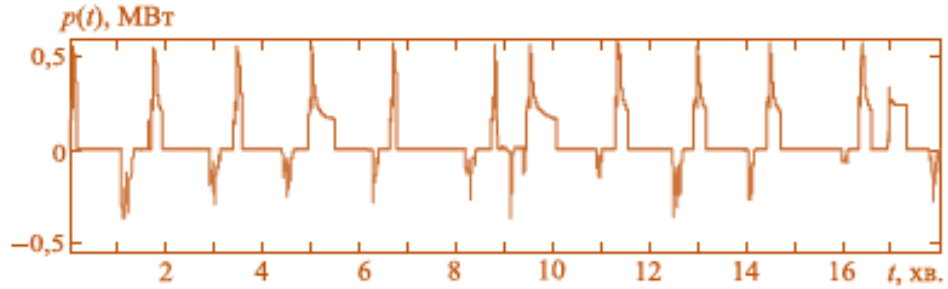
$$(P_{max}, P_{min})$$

- Діапазон зміни споживаної потужності:

$$\Delta P = P_{max} - P_{min}.$$



а)



б)

Рисунок 1.3 – Часові діаграми тягового електроспоживання та рекуперації в різних видах руху транспортних засобів: трамвай ТЗД (а), електропоїзд метрополітену 81-717(714)5М (б)

- Коефіцієнт мінімуму:

$$\beta = \frac{P_{min}}{P_{max}}.$$

- Середня потужність, яка споживається від джерела за цикл:

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt ,$$

- Коефіцієнт форми кривої потужності за цикл:

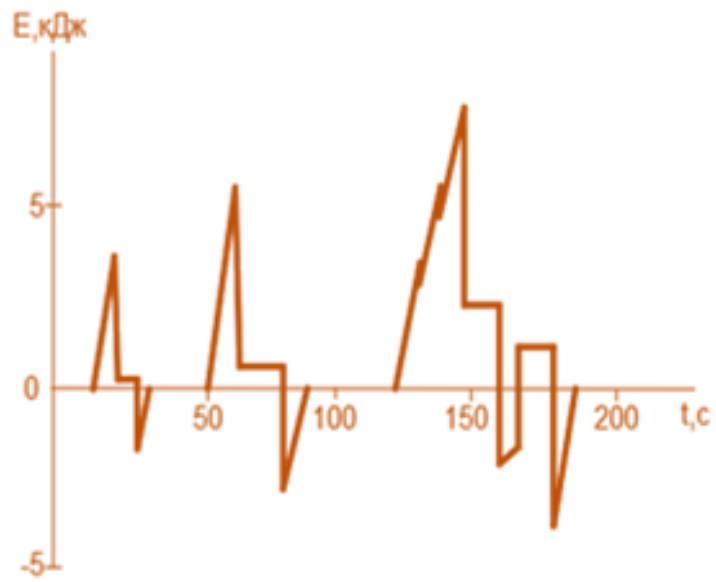
$$k_f = \frac{P_d}{P_{cp}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T p dt}.$$

Потужність джерел енергії доводиться розраховувати по максимуму навантаження P_{max} (якщо в системі немає накопичувачів енергії), і це означає, що значну частину часу циклу потужність джерела не реалізується повністю, іншими словами, доводиться мати істотно завищену потужність джерела енергії.

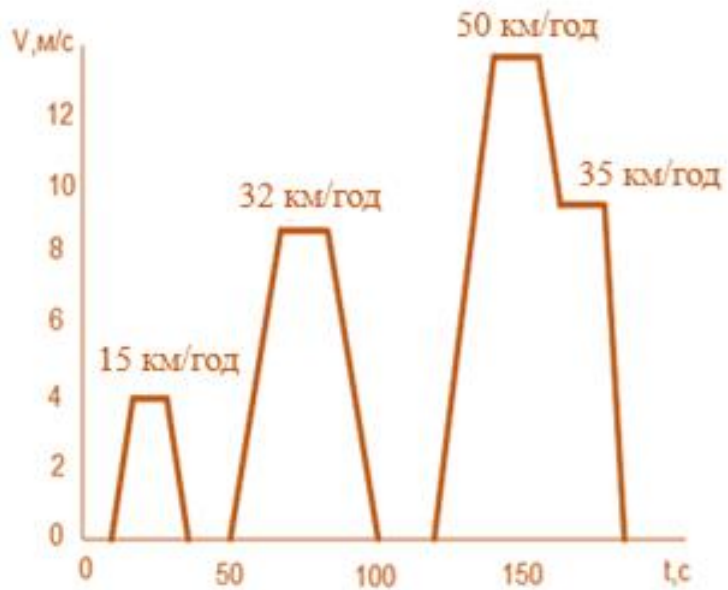
Для гібридних енергетичних установок та електробусів характерною є наявність накопичувачів енергії, що дозволяє зберігати енергію в інтервали спадів споживання і віддавати її в інтервали піків споживання. В результаті досягається можливість використовувати основні джерела енергії меншою встановленою потужністю, згладжуючи за допомогою накопичувачів енергії нерівномірність завантаження основних джерел. Застосування накопичувачів енергії в енергосистемі може переслідувати і ще одну мету, а саме зниження втрат потужності при її передачі від джерела до споживача.

Якщо головною метою використання накопичувачів енергії є згладжування нерівномірності навантаження основного джерела енергії, то для оцінки енергоефективності накопичувачів енергії зручніше користуватися граничними оцінками графіка навантаження. Якщо головне завдання накопичувачів енергії полягає в підвищенні енергоефективності, то зручніше користуватися показником k_f , оскільки для втрат потужності справедливе співвідношення [10]:

$$\Delta p \sim k_f^2.$$



а



б

Рисунок 1.3 – Електроспоживання тролейбуса з рекуперацією енергії в залежності від режиму руху [8]:

а) енергія споживання/гальмування; б) швидкість руху

Бортові енергосистеми транспортних засобів є дуже компактними і не мають протяжних ліній передачі електричної енергії від джерел до споживачів. У той же час споживання енергії від джерела характеризується вираженою нерівномірністю. З цих причин для оцінки енергоефективності бортових накопичувачів енергії зручніше використовувати граничні оцінки графіка споживання потужності. Найбільший ефект від встановлення накопичувачів енергії досягається тоді, коли вдається забезпечити умову

$$P_{max} = P_{cp}.$$

Тоді:

$$W_{зап} = W_{від},$$

де $W_{зап}$ – сумарна енергія, що запасається НЕ за період циклічності;

$W_{від}$ – сумарна енергія, що віддається НЕ за період циклічності.

За умови нерівномірного графіка споживання потужності (рис. 1.2) (при найпростіших випадках), енергоємність накопичувачів енергії визначається досить простим співвідношенням:

$$W_{HE} = \int_0^{t_3} (p - P_{cp}) dt.$$

У той же час, як правило графіки навантаження мають більш складний вид і часто визначаються випадковими чинниками. Так, наприклад, електрорухомий склад з бортовими накопичувачами енергії може експлуатуватися в різних умовах, з врахуванням видів руху, профілю колій,

змінної оперативної обстановки і т.д., в залежності від чого може змінюватися величина потоків енергії і циклічність споживання енергії. На рисунку 1.4 представлено два різних графіки споживання потужності з однаковим середнім значенням, характерні для руху з великими швидкостями і малим числом зупинок (крива 1) і для руху з меншими швидкостями і великим числом зупинок (крива 2). Очевидно, що в першому випадку розрахункова енергоефективність накопичувачів енергії виявиться істотно більшою.

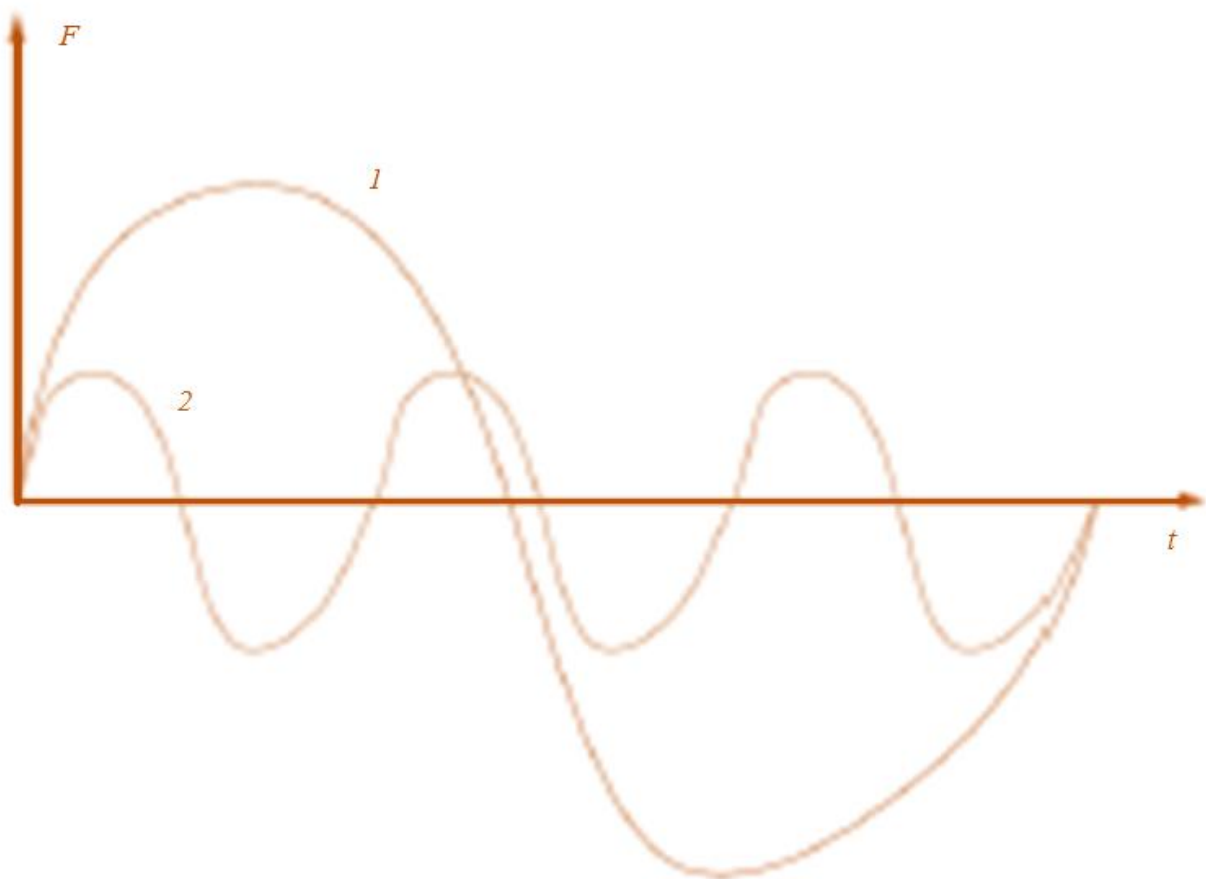


Рисунок 1.4 – Варіанти графіків зміни потужності [10]

Оцінка енергоефективності бортових накопичувачів енергії, виходячи з цільових передумов його використання на ЕРС, може виконуватися кількома підходами. Перший варіант дозволяє досягти найбільшої "пристосованості"

належних енергії під конкретні завдання і умови роботи тягової одиниці, тобто досягти найвищої ефективності використання накопичувачів енергії. Однак є недоліки: вартість бортового НЕ, адаптованого під конкретні умови роботи окремої одиниці ЕРС, буде порівняно високою; при такому підході звужується область ефективної експлуатації даної одиниці ЕРС, оскільки експлуатація її в інших умовах виявиться менш ефективною. Недоліки першого варіанту можуть бути певною мірою зменшені, якщо накопичувачі енергії виконуються у вигляді модульної конструкції і дозволяють нарощувати або зменшувати енергоемність, підключаючи (відключаючи) додаткові модулі НЕ залежно від змінених конкретних умов роботи одиниці ЕРС.

Інший підхід базується на виділенні типових режимів роботи ЕРС, їх статистичному обстеженні та розрахунку енергоефективності бортових накопичувачів енергії, виходячи з найбільш ймовірних умов роботи даного виду ЕРС. У разі рівнинного профілю доріг потужність електротранспорту, що розвивається в сталому режимі, значно менше номінальної. На гірському профілі потужність, що розвивається, більша, характерне чергування режимів тяги і регульовального гальмування при русі по спусках.

Третій підхід базується на визначенні енергоефективності бортових накопичувачів енергії на основі завдань, які він повинен виконувати на транспортному засобі (це може бути: акумулювання енергії при зупиночному електричному гальмуванні рухомого складу для використання її при розгоні в наступному циклі руху; вирівнювання графіка споживання потужності від основного джерела енергії (контактною мережі) з метою зниження нерівномірності енергоспоживання, підвищення ефективності роботи основного джерела енергії і зменшення його максимальної потужності; акумулювання надлишкової енергії рекуперації транспортного засобу в разі дисбалансу між генеруванням і споживанням енергії рекуперації та інші). Акумулювання енергії при зупиночному електричному гальмуванні рухомого

складу для використання її при розгоні в наступному циклі руху особливо доцільно визначати для рухомого складу, який працює переважно в пуско-гальмівних режимах при частих зупинках, тобто для міського електротранспорту.

1.1 Фактори, що впливають на енергоефективність електричного транспорту

Це включає ряд ключових аспектів. Оптимізація режимів руху трамваїв і тролейбусів під енерговитрати: Вдосконалення систем управління, впровадження ефективних алгоритмів регулювання швидкості, та розробка стратегій для зниження витрат енергії під час руху.

Зниження технологічних витрат на простій і пробіг транспортних засобів: Використання резерву регенеративного гальмування, адаптація систем управління для зменшення енергоспоживання в режимі очікування чи простою.

Підвищення коефіцієнта використання потужності електроприводів:

- оптимізація енергетичних систем, використання передових технологій електроприводів для забезпечення оптимального використання електроенергії;

- покращення технічного стану рухомого складу. Регулярний технічний облік і обслуговування, вдосконалення конструкцій для зменшення витрат енергії;

- підвищення обсягу енергії рекуперації. Впровадження технологій, що дозволяють більш ефективно відновлювати енергію при гальмуванні чи спуску;

- підвищення ККД транспортних засобів. Використання високоефективних систем кондиціонування, освітлення, інших енергоефективних технологій;

- застосування безстикових колій та лубрикація. Впровадження

технологій, що дозволяють зменшити опір руху і, відповідно, витрати енергії.

Зниження витрат електричної енергії на обсяг здійснених перевезень пасажирів є критичною задачею для господарств електричного транспорту. Міський електричний транспорт використовує енергетичні ресурси для руху транспортних засобів та перевезення пасажирів. Головну частину енергетичних ресурсів міського електротранспорту становить електрична енергія, яка споживається на тягу (пасажирські перевезення) в обсязі до 90-95%, тоді як 5-10% використовується на внутрішні технологічні потреби транспортних підприємств.

Серед пріоритетних завдань в галузі енергоспоживання розглядають розробку системи показників, характеристик та норм, оцінку енергетичної ефективності, енергоефективності та енергетичного еквіваленту. Пряма економія енергетичних ресурсів полягає у зменшенні витрат енергії на всіх етапах виробництва, перетворення та використання, удосконаленні організації та управління виробництвом, оптимізації режимів руху транспорту та удосконаленні обладнання за відношенням до енергетичної ефективності. Непряма економія енергоресурсів досягається через підвищення якості продукції, зменшення матеріалоемності, використання нових матеріалів і сировини. Ці заходи спрямовані на забезпечення більшого використання енергії та зменшення впливу електричного транспорту на навколишнє середовище.

1.2 Технічний стан пристроїв міського електротранспорту

Аналіз технічного стану обладнання міського електротранспорту вказує на те, що більшість технічних засобів енергетики електричного транспорту в даний час характеризується високим рівнем фізичного та морального зносу, а також завищеною енергоефективністю. Фактичний знос трамваїв і тролейбусів

за встановленими термінами служби становить приблизно 75 %, а пристроїв тягового електропостачання – від 75 % до 85 %. Стосовно стаціонарної електроенергетики, знос складає близько 50...60 %. Більше 60 % технічних засобів енергетики перебуває поза нормативним терміном експлуатації [11...14].

Застосування морально застарілої енергетичної установки з низькими конструктивними та експлуатаційними коефіцієнтами корисної дії (ККД) призводить до підвищення енерговитрат на її експлуатацію та ремонт. Зазначені аспекти свідчать про необхідність проведення регулярного технічного обслуговування, модернізації та заміни застарілого обладнання для підвищення енергоефективності та продовження терміну його служби.

Система електропостачання тягових мереж міського електротранспорту переважно застаріла і вимагає оновлення. Наразі тягові підстанції живляться напругою 10 кВ та 6 кВ. Понад 75 % тягових підстанцій міського електричного транспорту мають термін служби понад 42 роки, а 43 % - понад 50 років. Більше 80 % контактної мережі та тягових підстанцій міського електричного транспорту потребує повної реконструкції.

Аналіз причин утворення втрат енергоресурсів за всіма технічними засобами і технологіями міського електричного транспорту дозволяє сформулювати основні принципи підвищення їхньої енергоефективності. Основні напрямки енергозберігаючих технічних рішень і технологій для міського електричного транспорту можна розділити на такі:

- організаційні. Реформи в управлінні та організації електротранспорту для підвищення ефективності енергоспоживання;
- система енергопостачання. Оновлення та модернізація тягових підстанцій та контактної мережі для підвищення надійності та зменшення енерговитрат;

- модернізація транспортних засобів. Заміна застарілого транспорту новим, енергоефективнішим;
- покращення технологій утримання та ремонту. Запровадження сучасних методів обслуговування та ремонту для зменшення втрат;
- колійне господарство. Оптимізація і сучаснізація колійного господарства для підвищення продуктивності та зменшення опору руху;
- інші. Включає в себе широкий спектр заходів, таких як використання новітніх матеріалів, підвищення енергоефективності станцій, впровадження систем енергозбереження та управління.

Ці напрямки спрямовані на те, щоб створити сучасну, ефективну та енергоефективну систему електротранспорту в містах.

2 ВТРАТИ В ТЯГОВИХ МЕРЕЖАХ

В системі енергопостачання існує проблема відсутності чіткого обліку електроенергії на межі розділу балансової приналежності електричних мереж. Вимірювані та розрахункові величини змішуються, що призводить до неточності енергетичного балансу та неадекватного відображення реального електроспоживання. Для вирішення цієї проблеми потрібно значно підвищити точність вимірювання енергії. Також спостерігається тенденція зростання реактивних навантажень у тягових мережах, що виникає внаслідок нових умов оплати реактивної енергії, що вимагає оцінки рівня втрат.

На підстанціях ведеться облік як активної, так і реактивної енергії за допомогою індукційних лічильників САЗУ-І670М, СРЧУ-І673М та електронних лічильників Ф443АР. Використання індукційних лічильників у тягових мережах, що характеризуються несиметрією та несинусоїдальністю струмів і напруг, призводить до значних похибок при складанні енергетичного балансу. Оплата втрат енергії проводиться на підставі розрахункових даних при встановленні лічильників електроенергії на межі розділу балансової приналежності електромережі. Визначення втрат енергії в тяговій мережі є важливою задачею, існуюча система обліку використовує виміряні та розрахункові величини. Однак визначення точних значень втрат енергії залишається проблемою через варіювання обсягів споживання енергії на тягу та власних потреб підстанцій. Це ускладнює складання загального енергетичного балансу, і точне визначення втрат енергії залишається НЕ оскільки проблематичним завданням.

Отже, у системі енергопостачання важливо вдосконалити облік електроенергії на межі розділу балансової приналежності та використовувати більш точні та сучасні засоби вимірювань. Також потрібно розглядати ефективні методи компенсації реактивної потужності для зменшення реактивних навантажень у тягових мережах. Встановлення лічильників електроенергії на

межі розділу балансової приналежності є ключовим для точної оплати втрат енергії. Розвиток нових технологій та методів вимірювань допоможе вирішити проблеми, пов'язані із складанням енергетичного балансу та визначенням втрат енергії в тяговій мережі.

Невизначеність у цьому питанні дозволяє списувати на звані «умовні» втрати, організаційно-економічні недоліки різних служб і підрозділів, залізниць. У цих умовах на низці доріг втрати в тяговій мережі змінного струму оцінюють 10...15 %, а в тяговій мережі постійного струму 15...25 %, тоді як дійсні втрати енергії в середньому становлять 2...3 % і 4...7 % [18]. Ускладнює ситуацію і те, що на даний момент не існує достовірного методу розрахунку систем електропостачання, що ставить завдання з розробки такого методу на перший план.

Загальні втрати у системі тягового електропостачання визначаються за такою формулою [15]:

$$\Delta W_{\text{ЕЧ}} \% = (\sum \Delta W_{\text{П}} + \sum \Delta W_{\text{КМ}} + \sum \Delta W_{\text{ВЛ}}) \cdot 100\% / \sum W_{\text{Р}}$$

де: $\Delta W_{\text{ВЛ}}$ - втрати енергії в лініях, що належать дистанції електропостачання ЕЧ;

$\Delta W_{\text{П}}$ - втрати в обладнанні підстанції;

$W_{\text{Р}}$ - середнє протягом місяця значення втрат тягової підстанції;

$\Delta W_{\text{КМ}}$ - втрати енергії в контактній мережі.

2.1 Втрати енергії у трансформаторах

Трансформатор – це статичний електромагнітний пристрій з двома або більше індуктивно пов'язаними обмотками, призначений для перетворення електричної енергії за допомогою електромагнітної індукції в електричних мережах та установках. Силовий трансформатор є одним з ключових компонентів будь-якої електричної мережі. Зростання потреби в розподілі енергії

між численними споживачами призводить до значного збільшення кількості окремих трансформаторів порівняно з числом генераторів.

Процес перетворення енергії у трансформаторі відбувається за допомогою магнітного поля, створеного сердечником та обмотками. Завжди супроводжується втратами енергії, тому потужність P_2 , яку трансформатор передає споживачеві, завжди менша за потужність P_1 , яка подається до нього. Відношення цих величин, $\eta = P_2/P_1$, називають коефіцієнтом корисної дії (ККД). ККД трансформаторів дуже великий, і більшість їх складає 98...99 %, проте необхідність багаторазового перетворення енергії призводить до того, що загальні втрати енергії трансформаторів досягають значних значень [6].

Втрати короткого замикання визначаються як втрати, що виникають у трансформаторі при номінальній частоті в одній з обмоток струму, що відповідає його номінальній потужності, при замкнутій короткій вторинній обмотці. Втрати короткого замикання можуть бути розділені на такі:

- основні втрати в обмотках ПН та ВН, спричинені робочим струмом обмоток;
- додаткові втрати від вихрових струмів, наведених полем розсіювання в обмотках;
- втрати у відводах між обмотками та вводами;
- втрати в стінках бака та інших металевих елементах конструкції трансформатора.

Режим експлуатації трансформатора при живленні однією з його обмоток від джерела зі змінною напругою при відкритих інших обмотках отримав назву "режим холостого ходу". Втрати, що виникають у трансформаторі в режимі холостого ходу при номінальній синусоїдальній напрузі на первинній обмотці та номінальній частоті, визначаються як втрати холостого ходу. Вони включають магнітні втрати, тобто втрати в активному матеріалі (сталі) магнітної системи, втрати в сталевих елементах конструкції основи трансформатора, викликані

частковим відгалуженням головного магнітного потоку, основні втрати в первинній обмотці, викликані струмом холостого ходу в ізоляції. Діелектричні втрати в ізоляції можуть відігравати роль тільки в трансформаторах, які працюють при підвищеній частоті, а в силових трансформаторах, розрахованих на частоту 50 Гц, зазвичай є невеликими і можуть не враховуватися. Основні втрати в первинній обмотці становлять 1% від загальних втрат холостого ходу і, як правило, не враховуються. Магнітні втрати - втрати в активній сталі магнітної системи - складають основну частину втрат холостого ходу і можуть бути розділені на втрати від гістерезису та вихрових струмів. Для сучасної холоднокатаної сталі втрати від гістерезису становлять 25-35%, а від вихрових струмів – 75...65 % від загальних втрат.

При роботі трансформатора втрати холостого ходу виникають у його магнітній системі протягом усього часу роботи, є постійними і не залежать від струму навантаження. Зменшення втрат холостого ходу досягається головним чином шляхом широкого застосування холоднокатаної електротехнічної рулонної сталі з покращеними магнітними властивостями. Застосування цієї сталі, яка має анізотропію магнітних властивостей і дуже чутлива до механічних пошкоджень при обробці, поєднується з істотною зміною конструкції магнітних систем [12].

На відміну від попереднього режиму, втрати короткого замикання змінюються зі зміною струму навантаження і залежать від графіка навантаження трансформатора. Зменшення втрат короткого замикання досягається зниженням щільності струму за рахунок збільшення маси металу в обмотках. При розробці трансформаторів виникає проблема обмеження додаткових втрат, що виникають від вихрових струмів, що наводяться магнітним полем розсіювання в обмотках, і від вихрових струмів та гістерезису, що виникають в елементах конструкції трансформатора. Ці втрати в сумі можуть сягати 25...30 % від загальних втрат короткого замикання. Як найбільш ефективні засоби для зменшення додаткових

втрат використовують: раціональне розміщення витків обмоток для зменшення поперечної складової поля розсіювання, штучну локалізацію поля розсіювання за допомогою установки магнітних екранів з електротехнічної сталі і заміну деяких сталевих деталей деталями з немагнітних матеріалів. Надалі найбільш радикальним розв'язанням цієї проблеми може бути заміна сталевих деталей, у яких виникають втрати від гістерезису та вихрових струмів, неметалевими або деталями з немагнітних матеріалів.

Проведемо розрахунок втрат у двохобмоточному трансформаторі, для чого у двохобмоточному трансформаторі нам необхідні будуть такі дані:

а) паспортні:

- номінальна потужність $S_{ном}$;
- Втрати активної потужності в сталі $\Delta P_{хх}$;
- Втрати активної потужності в міді $\Delta P_{кз}$;
- Струм холостого ходу $I_{хх}$;
- напруга короткого замикання $U_{кз}$;

б) споживання активної $W_{P\phi}$ та реактивної $W_{Q\phi}$ електроенергії за розрахунковий період;

в) кількість часу роботи трансформатора за розрахунковий період $T_{н}$;

г) кількість часу роботи споживача за розрахунковий період $T_{р}$;

При визначенні втрат послідовно визначаються:

а) середня фактична потужність трансформатора за розрахунковий період:

$$S_{\phi} = \sqrt{(P_{\phi}^2 + Q_{\phi}^2)}; \quad P_{\phi} = W_{P\phi} / T_{р}; \quad Q_{\phi} = W_{Q\phi} / T_{р};$$

б) коефіцієнт завантаження: $K_{з} = S_{\phi} / S_{ном}$;

в) втрати активної електроенергії

$$\Delta W_{P} = \Delta P_{хх} \cdot T_{н} + \Delta P_{кз} \cdot K_{з}^2 \cdot T_{р};$$

г) втрати реактивної електроенергії:

$$\Delta WQ = \Delta Q_{ХХ} \cdot T_{Н} + \Delta Q_{КЗ} \cdot K_{З}^2 \cdot T_{р};$$

де:

$$\Delta Q_{ХХ} = S_{НОМ} \cdot I_{ХХ} / 100; \quad \Delta Q_{КЗ} = S_{НОМ} \cdot U_{КЗ} / 100;$$

Втрати у трансформаторах, які живлять тягове навантаження:

а) втрати активної енергії кВт·год:

$$\Delta WP = \Delta P_{ХХ} \cdot T_{Н} + \Delta P_{КЗ} \cdot K_{З}^2 \cdot K_{еф}^2 \cdot T_{р};$$

де $K_{еф} = 1.1 \dots 1.3$ – коефіцієнт ефективності тягового навантаження.

б) втрати реактивної електроенергії:

$$\Delta WQ = \Delta Q_{ХХ} \cdot T_{Н} + \Delta Q_{КЗ} \cdot K_{З}^2 \cdot K_{еф}^2 \cdot T_{р}$$

Технічні дані трансформаторів наведені у таблицях 2.1, 2.2.

Таблиця 2.1 – Технічні дані двохобмотувальних однофазних трансформаторів [12]

Тип трансформатора	Номинальна потужність $S_{Н}$, кВА	Номинальна напруга $U_{Н}$, кВ		Втрати, Вт		Струм $I_{ХХ}$, %	Напруга к.з., $U_{КЗ}$, %
		ВН	НН	$\Delta P_{ХХ}$	$\Delta P_{КЗ}$		
1	2	3	4	5	6	7	8
ОМ-0.63/6	0.63	6	0.115/0.23	18	48	34	6.8
ОМ-0.63/10	0.63	10	0.115/0.23	18	48	34	6.8

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
ОМ-0.66/6	0.66	6.3	0.23	36	50	21	8
ОМ-0.66/10	0.66	10	0.23	26	56	45	9
ОМ-1.2/6	1.2	6.3	0.23	40	73	23	7
ОМ-1.2/10	1.2	10	0.23	30	65	25	7
ОМ-1.25/6	1.25	6	0.115/0.23	23	60	23	6.0
ОМ-1.25/10	1.25	10	0.115/0.23	23	60	23	6.0
ОМ-4/6	4	6	0.23/0.4	55	140	8	4.0
ОМ-4/10	4	10	0.23/0.4	55	140	8	4.0
ОМ-4/27.5	4	27.5	0.23	80	140	8	4.0
ОМ-10/6	10	6	0.23/0.4	90	300	7	4.0
ОМ-11/10	10	10	0.23/0.4	90	300	7	4.0
ОМ-10/27.5	10	27.5	0.23	160	300	15	6.0

Таблиця 2.2 – Технічні дані двохобмотувальних трьохфазних трансформаторів [12]

Тип трансформатора	Номінальна потужність S _н , кВА	Номінальна напруга U _н , кВ		Втрати, Вт		Струм х.х., I _{хх} ,%	Напру га к.з., U _{кз} ,%
		ВН	НН	ΔP _{хх}	ΔP _{кз}		
1	2	3	4	5	6	7	8
ТМН-6300/110-66	6300	115	6.6	13	50	1.0	10.5
ТМН-10000/110-67	10000	115	6.6	18	60	0.9	10.5
ТДН-16000/110-66	16000	115	6.6	26	85	0.85	10.5
ТРДН-25000/110-У1	25000	115	6.3	25	120	0.9	10.5
ТРДН-32000/110-У1	32000	115	6.3	32	145	0.7	10.5
ТРДН-40000/110-У1	40000	115	6.3	42	160	0.65	10.5
ТМ-20/10	20	10	0.23, 0.4	0.22	0.6	10	5.5
ТМ-50/10	50	10	0.23, 0.4	0.44	1.32	8	5.5

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8
ТМ-180/10	180	10	0.23,0.4,0.52	1.2	4.1	7	5.5
ТМ-320/10	320	10	0.23,0.4,0.52	1.9	6.2	7	5.5
ТМ-560/10	560	10	0.23,0.4,0.52	2.5	9.4	6	5.5
ТМ-1000/35	1000	35	0.4,10.5	5.1	15	5.5	6.5
ТМ-1800/10,6	1800	10	6.3,0.525,0.4	8	24	4.5	5.5
ТМ-56600/10	5600	10	6.5	18	56	4	5.5
ТМ-25/10	25	6,10	0.23,0.4	0.13	0.6	3.2	4.5
ТМ-100/35	10	35	0.4	0.46 5	1.9 7	2.6	6.5
ТМВМ-160/10	160	6,10	0.4,0.69	0.46	2.6 5	2.4	4.5
ТМФ-160	160	6,10	0.4	0.56 5	3.1	2.4	4.7
ТМФ-250	320	6,10	0.69	0.82	4.2	2.3	4.5
ТМ-400/35	400	35	0.4,0.69	1.15	4.2	3.5	4.5
ТМ-630/10	630	6,10	0.23,0.4,0.69	1.56	7.6	2	5.5
ТМФ-630	630	6,10	0.4	1.56	8.5	2	5.5
ТМ-1000/35	1000	35	10.5,6.3,0.4	2.75	12. 2	1.5	6.5
ТМ-1600/10	1600	6,10	0.4,0.69	3.3	18	1.3	5.5
ТМ-1600/35	1600	35	10.5,6.3,0.4	3.65	18	1.4	6.5
ТМ-2500/35	2500	35	6.3,10.5	5.1	25	1.1	6.5
ТМ-4000/35	4000	35	10.5,6.3	6.7	33. 5	1	7.5
ТМ-16000/35	16000	38.5	6.3,10.5	21	90	0.6	8

Зробимо розрахунок втрат у трьохобмотувальному трансформаторі, для чого нам знадобляться такі дані:

а) паспортні дані:

- номінальна потужність $S_{ном}$, кВА;
- потужність обмоток ВН, СН, ПН - $S_{вн}$, $S_{сн}$, $S_{пн}$, кВА;
- втрати потужності в міді обмоток $\Delta P_{вн}$, $\Delta P_{сн}$, $\Delta P_{пн}$, кВА;
- Струм холостого ходу $I_{хх}$, %;
- Втрати реактивної потужності при холостому ході, кВ:

$$\Delta Q_{хх} = S_{ном} \cdot I_{хх} / 100$$

-напруга короткого замикання кожної обмотки, %:

$$U_{кв} = 0,5 (U_{вн-сн} + U_{вн-пн} - U_{сн-пн});$$

$$U_{кс} = 0,5 (U_{вн-сн} + U_{сн-пн} - U_{вн-пн});$$

$$U_{кп} = 0,5 (U_{вн-пн} + U_{сн-пн} - U_{вн-сн});$$

де: $U_{вн-пн}$, $U_{сн-пн}$, $U_{вн-сн}$ – відповідно напруги короткого замикання між обмотками.

- реактивна потужність, що споживається обмотками:

$$\Delta Q_{вн} = S_{вн} \cdot U_{кв} / 100 \quad \Delta Q_{сн} = S_{сн} \cdot U_{кс} / 100 \quad \Delta Q_{пн} = S_{пн} \cdot U_{кп} / 100$$

- споживання активної ($W_{P_{вн}}$, $W_{P_{сн}}$, $W_{P_{пн}}$), кВт.год та реактивної ($W_{Q_{вн}}$, $W_{Q_{сн}}$, $W_{Q_{пн}}$), квар.ч електроенергії, що пройшла за розрахунковий період через обмотки визначаються за показаннями розрахункових лічильників на стороні високої та низької напруги:

$$W_{P_{вн}} = W_{P_{сн}} + W_{P_{пн}}; \quad W_{Q_{вн}} = W_{Q_{сн}} + W_{Q_{пн}};$$

- кількість часу роботи трансформатора за розрахунковий період T_n ;
- кількість часу роботи споживача за розрахунковий період T_r ;

При розрахунку послідовно визначаються:

а) фактична потужність кожної обмотки трансформатора за розрахунковий період:

$$S_{фвн}=\sqrt{(P_{фвн}^2+Q_{фвн}^2)}; S_{фсн}=\sqrt{(P_{фсн}^2+Q_{фсн}^2)}; S_{фнн}=\sqrt{(P_{фнн}^2+Q_{фнн}^2)}$$

де:

$$P_{фвн} = WP_{фвн}/T_p; \quad Q_{фвн} = WQ_{фвн}/T_p;$$

$$P_{фсн} = WP_{фсн}/T_p; \quad Q_{фсн} = WQ_{фсн}/T_p;$$

$$P_{фнн} = WP_{фнн}/T_p; \quad Q_{фнн} = WQ_{фнн}/T_p;$$

б) коефіцієнт завантаження кожної з обмоток:

$$K_{звн}=S_{фвн}/S_{вн};$$

$$K_{зсн}=S_{фсн}/S_{сн};$$

$$K_{знн}=S_{фнн}/S_{нн};$$

в) втрати активної енергії:

$$\Delta WP=\Delta P_{хх}^2 \cdot T_H+(K_{звн}^2 \cdot \Delta P_{вн}+\Delta P_{сн} \cdot K_{зсн}^2+\Delta P_{нн} \cdot K_{знн}^2) \cdot T_p;$$

г) втрати реактивної енергії:

$$\Delta WQ=\Delta Q_{хх}^2 \cdot T_H+(K_{звн}^2 \cdot \Delta Q_{вн}+\Delta Q_{сн} \cdot K_{зсн}^2+\Delta Q_{нн} \cdot K_{знн}^2) \cdot T_p;$$

Для тягового трансформатора тягової підстанції змінного струму:

в) втрати активної енергії:

$$\Delta WP=\Delta P_{хх}^2 \cdot T_H+(K_{звн}^2 \cdot \Delta P_{вн}+\Delta P_{сн} \cdot K_{зсн}^2+\Delta P_{нн} \cdot K_{знн}^2) \cdot T_p \cdot K_{еф}^2;$$

г) втрати реактивної енергії:

$$\Delta WQ=\Delta Q_{хх}^2 \cdot T_H+(K_{звн}^2 \cdot \Delta Q_{вн}+\Delta Q_{сн} \cdot K_{зсн}^2+\Delta Q_{нн} \cdot K_{знн}^2) \cdot T_p \cdot K_{еф}^2;$$

Таблиця 2.3 – Технічні дані трьохобмоточних трьохфазних трансформаторів [12]

Тип трансформатора	Потужність, МВА	напряга обмоток, кВ			напряга КЗ, %			Втрати, кВт	
		ВН	СН	НН	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН	КЗ	ХХ
ТДТНЖ-25000/110-81У1	25.0	115	27.5	6.6	10.5	18.0	6.8	140	28.5
ТДТНЖ-25000/110-81У1	25.0	115	38.5	27.5	18.0	10.5	6.8	140	28.5
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	1	2
ТДТНЖ-40000/110-81У1	40.0	115	38.5	27.5	18.0	10.5	6.8	200	39
ТДТНЖ-40000/230-81У1	40.0	230	38.5	27.5	22.0	12.5	9.5	220	54
ТДТН-16000/110-70	10.0	115	38.5	6.6	10.5	17.5	6.3	76	17
ТДТН-10000/110	10.0	115	38.5	11.0	10.5	17.5	6.5	76	17
ТДТН-16000/110	16.0	115	38.5	11.0	10.5	17.5	6.5	100	21
ТДТН-25000/110	25.0	115	38.5	11.0	10.5	17.5	6.5	140	28.5
ТДТН-40000/110	40.0	115	38.5	6.66	10.5	17.5	6.5	200	39.0
ТДТН-16000/150-У1	16.0	158	38.5	11.0	11.0	18.0	6.0	96.0	22.5
ТДТН-40000/150-У1	40.0	158	38.5	6.6	10.5	18.5	7.0	200	39.0
ТДТНЭ-20000/110-Б	20.0	115	27.5	11.0	10.5	17.0	6.0	127	45.0
ТДТНЭ-25000/110-67	25.0	115	27.5	6.6	10.5	17.0	6.0	145	45.0
ТДТНЭ-40000/110-67	40.0	115	27.5	6.6	10.5	17.5	6.0	200	63.0
ТДТНЭ-25000/150-70	25.0	158	27.5	6.6	10.5	18.0	6.0	145	34.0
ТДТНЭ-40000/150-71	40.0	158	27.5	6.6	10.5	17.0	6.0	185	43.0
ТДТНЭ-40000/220-70У1	40.0	230	27.5	11.0	12.5	22.0	9.5	240	66.0

Таблиця 2.4 – Характеристики інших трансформаторів [12]

Тип трансформатора	Номинальна потужність S_n , кВА	Втрати ,Вт	
		ΔP_{xx}	$\Delta P_{кз}$
Перетворювальні трансформатори			
ТРДП-16000/10ЖУ1	13430	16,0	71,5
ТРДП-16000/35ЖУ1	13430	13,5	81,0
ТРДП-12500/10ЖУ1	11400	18,7	84,0
ТРДП-12500/35ЖУ1	11400	18,7	96,0
ТМПУ-6300/35Ж	4640	15,0	50,0
ТМПУ-63000/35ЖУ1	4640	10,0	41,0
ТМП-6300/35У1	6000	10,7	42,0
ТМРУ-16000/10-1	11100	48,0	85,0
ТМРУ-16000/10Ж	11840	33,0	79,0
ТМРУ-16000/10ЖУ1	11840	24,0	73,0
ТДП-12500/10ЖУ1	11800	16,0	72,5
ТДРУНГ-20000/110	12500	35,0	90,0
Понижуючі трансформатори			
ТДТН-16000/110-66	16000	32	105
ТДТНЭ-25000/110-69	25000	45	145
ТДТН-31500/110	31500	75	225
ТДТНЭ-40000/110	40000	63	200
ТДТН-63000/110-67	63000	87	310
ТДТН-25000/220	25000	50	135
ТДТНЭ-40000/220-70	40000	66	240
ТДТН-63000/220	63000	91	320

2.2 Втрати енергії у контактній мережі

Втрати енергії в тяговій мережі складаються з чотирьох складових: контактної та рейкової мереж, які живлять та відсмоктують проводи. Живильні та відсмоктують проводи виконують у вигляді повітряних або кабельних ліній. Рейкова мережа є сукупністю ниток ходових рейок. Контактна мережа складається з безлічі проводів різних типів, з'єднаних між собою різними способами і призначена для передачі електричної енергії до локомотивів, що рухаються шляхом безпосереднього контакту їх з струмоприймачами.

У світі розвитку отримали дві системи тягового електропостачання: системи постійного та змінного струму. Існує безліч варіантів передачі енергії до локомотивів, але в Україні застосування знайшли лише три: система постійного струму, напругою 3.3 кВ, частотою 1.5 Гц; система однофазного змінного струму 25 кВ, 50 або 60 Гц та система змінного струму з екрануючими підсилюючими проводами ЕУП-27.5 кВ. А також проводиться економічне обґрунтування переходу на систему змінного струму 2*25 кВ, де потужність передається вищою напругою 50 кВ. З точки зору втрат тягова мережа змінного струму краща, оскільки потужність передається підвищеним значенням напруги, тому втрати в системі нижче.

Живлення тягової мережі на одноколійних ділянках здійснюється за односторонньою та двосторонньою схемами живлення. При односторонньому живленні локомотиви отримують енергію від однієї тягової підстанції, і струм I , що споживається локомотивом, надходить з одного боку, а при двосторонньому живленні від двох, і струм I , споживаний локомотивом, надходить до нього з двох сторін, і складається зі струмів I_1 і I_2 . Значення I_1 і I_2 обернено пропорційні відстані від локомотива до відповідної тягової підстанції. Зі збільшенням струму у проводах контактної мережі зростають втрати напруги та електроенергії. Так при односторонньому живленні втрати потужності дорівнюють $\Delta P = I^2 \cdot R \cdot l$, а

втрати напруги $\Delta U = I \cdot R \cdot l$. При двосторонньому живленні втрати потужності дорівнюють $\Delta P = I^2/2 \cdot R \cdot l$, а втрати напруги $\Delta U = I/2 \cdot R \cdot l$. З точки зору втрат двостороннє живлення краще, але з точки зору надійності гірше, тому що при виникненні пошкодження контактної мережі з ладу вийде вся ділянка, а на змінному струмі можуть виникати перетоки потужності, тому що напруги на шинах суміжних тягових підстанцій різні. Від розміру втрат залежить напруга на струмоприймачі локомотива, що впливає на швидкість руху: чим більше втрати і менше напруга на струмоприймачі, тим нижча швидкість, яку може розвинути локомотив. Крім того, зниження напруги для моторвентилятора може призвести до того, що він знизить свої оберти, зменшиться потік повітря, що охолоджує, і двигун буде перегріватися. У зв'язку з цим за умовами пропускної спроможності встановлено норми напруги: на постійному струмі $U_{\text{мін}} = 2.7$ кВ, а на змінному $U_{\text{мін}} = 21$ кВ. Зниження втрат енергії в контактній мережі дозволяє економію споживаної електроенергії.

Живлення двоколійних ділянок зазвичай здійснюють двосторонньою схемою живлення. Застосовуються такі схеми харчування: роздільна схема живлення, вузлова схема та паралельна схема живлення.

При роздільному живленні колій кожна контактна підвіска отримує енергію від тягових підстанцій незалежно одна від одної. Втрати енергії в цьому випадку аналогічні одноколійній ділянці.

При встановленні поста секціонування утворюється вузлова схема живлення, коли кожен локомотив в нормальних умовах отримує енергію від обох тягових підстанцій по контактних мережах обох шляхів, що за інших рівних умов забезпечує менші втрати енергії та напруги в мережі.

Найбільш економічною є схема паралельного з'єднання контактних підвісок колій, яке здійснюють у кількох місцях на ділянці між тяговими підстанціями за допомогою спеціальних пунктів паралельного з'єднання ППЗ. При цьому краще вирівнюються навантаження окремих шляхів і більше

знижуються втрати напруги та енергії, ніж за вузлової схеми. Особливо ефективно паралельне з'єднання контактних мереж шляхів на ділянках, де застосовують рекуперацію електричної енергії, так як енергія, що рекуперується, відразу передається локомотивам на інших шляхах. При схемі, що розглядається, у разі необхідності також можуть бути встановлені пости секціонування.

Забезпечення живлення двоколіїних ділянок зазвичай реалізується за допомогою двосторонньої схеми живлення. Використовуються такі схеми подачі енергії: роздільна схема живлення, вузлова схема та паралельна схема живлення.

При роздільному живленні колій кожна контактна підвіска отримує енергію від тягових підстанцій незалежно одна від одної. Втрати енергії в цьому випадку аналогічні одноколіїній ділянці.

При встановленні пункту секціонування утворюється вузлова схема живлення, коли кожен локомотив в нормальних умовах отримує енергію від обох тягових підстанцій по контактних мережах обох шляхів, що за інших рівних умов забезпечує менші втрати енергії та напруги в мережі.

Найбільш економічною є схема паралельного з'єднання контактних підвісок колій, яке здійснюється в кількох місцях на ділянці між тяговими підстанціями за допомогою спеціальних пунктів паралельного з'єднання (ППЗ). При цьому краще вирівнюються навантаження окремих шляхів і більше знижуються втрати напруги та енергії, ніж за вузлової схеми. Особливо ефективно паралельне з'єднання контактних мереж шляхів на ділянках, де застосовується рекуперація електричної енергії, так як енергія, що рекуперується, відразу передається локомотивам на інших шляхах. При розгляді розглядуваної схеми у разі необхідності також можуть бути встановлені пункти секціонування.

Втрата енергії в тяговій мережі для кожної міжпідстанційної зони визначається таким чином:

$$\Delta W_{tc} = \Delta W_{tc1} + \Delta W_{tc2};$$

де: $\Delta W_{тс1}$ - активні втрати в тяговій мережі, які спричинені перебігом активної та реактивної складової струмів електровозів;

$\Delta W_{тс2}$ - активні втрати в тяговій мережі, які спричинені протіканням зрівняльних струмів (лише на змінному струмі).

Зробимо розрахунок втрат енергії у тяговій мережі постійного струму.

а) Вузлова схема живлення:

$$\Delta W_{тс1} = r_1 \cdot W_{рм^2} \cdot (18.5/N + 0.003 \cdot l) \cdot 10^{-3}, \text{ тис. кВт} \cdot \text{год.}$$

б) Паралельне з'єднання шляхів (за наявності посту секціонування і не менше двох пунктів паралельного з'єднання):

$$\Delta W_{тс1} = r_2 \cdot W_{рм^2} \cdot (31.7/N + 0.006 \cdot l) \cdot 10^3, \text{ тис. кВт} \cdot \text{год.}$$

в) Двостороннє живлення одноколійної ділянки:

$$\Delta W_{тс1} = r_1 \cdot W_{рм^2} \cdot (31.7/N + 0.006 \cdot l) \cdot 10^3, \text{ тис. кВт} \cdot \text{год.}$$

г) Консольне живлення одноколійної ділянки:

$$\Delta W_{тс1} = r_1 \cdot W_{рм^2} \cdot (110/N + 0.016 \cdot l) \cdot 10^3, \text{ тис. кВт} \cdot \text{год.}$$

Розрахунок втрат енергії у тяговій мережі змінного струму.

а) Вузлова схема живлення:

$$\Delta W_{тс1} = r_1 \cdot W_{рм^2} \cdot (150/N + 0.14 \cdot l) \cdot 10^{-6}, \text{ тис. кВт} \cdot \text{год.}$$

б) Паралельне сполучення шляхів:

$$\Delta W_{тс1} = r_2 \cdot W_{рм^2} \cdot (314/N + 0.22 \cdot l) \cdot 10^6, \text{ тис. кВт} \cdot \text{год.}$$

в) Консольне живлення одноколійної ділянки:

$$\Delta W_{тс1} = r_1 \cdot W_{рм^2} \cdot (1850/N + 0.92 \cdot l) \cdot 10^6, \text{ тис. кВт} \cdot \text{год.}$$

г) Двостороннє живлення одноколійної ділянки:

$$\Delta W_{тс1} = r_1 \cdot W_{рм^2} \cdot (820/N + 0.155 \cdot l) \cdot 10^6, \text{ тис. кВт} \cdot \text{год.}$$

Втрати енергії на мережі багатоколійних ділянок обчислюються як сума втрат, що виникають на окремих одноколійних ділянках. Апроксимаційний підхід до визначення втрат електроенергії в міжпідстанційній зоні передбачає врахування втрат, що виникають на прилеглих підстанціях, з урахуванням відношення довжини та кількості шляхів розглядуваної ділянки. Також враховуються втрати в міжпідстанційних зонах, які живляться від розглядуваної підстанції.

Аналітичний огляд визначення втрат енергії базується на розрахунках за формулою:

$$P_{\text{втрат}} = 2I^2 \cdot R \cdot l$$

де:

$P_{\text{втрат}}$ - сумарні енергетичні втрати в системі;

I - електричний струм, який споживають локомотиви;

R - електричний опір контактної мережі;

l - відстань між тяговими підстанціями.

У великих мережах втрати енергії розглядають як суму втрат на кожній окремій колії. Аналіз міжпідстанційних зон передбачає врахування втрат на прилеглих підстанціях враховуючи співвідношення довжини та кількості шляхів розглядуваної ділянки і міжпідстанційних зон, що отримують живлення від розглядуваної підстанції."

У розглянутих вище формулах прийнято такі позначення:

r_1 - питомий активний опір одноколійної ділянки, Ом/км;

r_2 - питомий активний опір двоколійної ділянки, Ом/км;

N - середнє число пар поїздів дільниці;

l - довжина міжпідстанційної зони, км;

W_{pm} - місячне споживання електроенергії поїздами на міжпідстанційній зоні, тис. кВт·год;

$$W_{pm} = W_{p1ot} + W_{p2ot} - (W_{p1g} + W_{p2g});$$

де: W_{p1ot} , W_{p2ot} - активна енергія, відпущена в тягову мережу першою та другою підстанцією відповідно;

W_{p1g} , W_{p2g} - активна енергія, генерована в енергосистему через фідера першої та другої підстанції відповідно.

Розрахунок втрат енергії від зрівняльних струмів.

Для приблизної оцінки втрат у контактній мережі від зрівняльних струмів можна використати формулу:

$$\Delta W_{tc2} = (W_{p1g^2} + W_{q1g^2}) / (U_{cp1^2} \cdot T_n) \cdot Re + (W_{p2g^2} + W_{q2g^2}) / (U_{cp2^2} \cdot T_n) \cdot Re,$$

де:

W_{p1g} , W_{p2g} - активна енергія, генерована в енергосистему через фідера першої та другої підстанції відповідно;

W_{q1g} , W_{q2g} - реактивна енергія, генерована в енергосистему через фідера

першої та другої підстанції відповідно;

R_e - активний опір всієї тягової мережі міжпідстанційної зони, Ом (при двоколінійній ділянці вважаємо, що контактна мережа з'єднана паралельно, а опір рейки ділимо навпіл);

$U_{ср}$ - середня напруга фідерів тягових підстанцій, кВ;

T_n - звітний період, год.

Опір рейок Ом/км в залежності від різних значень струму I_p , А в рейці наведено у таблиці 2.5, а питомі активні опори контактних мереж – у таблиці 2.6.

Таблиця 2.5 – Опір рейок Ом/км в залежності від різних значень струму I_p , А в рейці [19]

Тип рейок	Струм у рейці I_p, A			
	0	100	200	300
Активний опір рейок R_p				
P75	0.14	0.15	0.19	0.22
P65	0.15	0.16	0.20	0.24
P50	0.17	0.18	0.23	0.28
P43	0.19	0.21	0.27	0.33
Індуктивний опір рейок X_p				
P75	0.10	0.11	0.14	0.17
P65	0.11	0.12	0.15	0.18
P50	0.13	0.14	0.17	0.21
P43	0.14	0.16	0.20	0.25

Таблиця 2.6 – Питомі активні опори контактних мереж [19]

Марки проводів тягової мережі	Одноколійна ділянка r_1 , Ом/км	Двоколійна ділянка	
		Один шлях, r_1 , Ом/км	Паралельне з'єднання r_2 , Ом/км
1	2	3	4
Постійний струм			
M120+2МФ100	0,07	0,067	0,034
M120+2МФ100+A185	0,054	0,049	0,026
M120+2МФ100+2A185	0,044	0,04	0,021
M120+2МФ100+3A185	0,038	0,034	0,018
ПБСМ95+2МФ100	0,094	0,089	0,046
ПБСМ95+2МФ100+A185	0,064	0,06	0,032
ПБСМ95+2МФ100+2A185	0,049	0,045	0,024
M120+2МФ150	0,062	0,058	0,031
M120+2МФ150+A185	0,048	0,045	0,024
M120+2МФ150+2A185	0,04	0,036	0,02
M120+2МФ150+3A185	0,035	0,031	0,017
Змінний струм			
ПБСМ70+МФ100	0,209	0,195	0,111
ПБСМ95+МФ100	0,194	0,182	0,104
M120+МФ100	0,124	0,112	0,07
ПБСМ70+МФ100+A185	0,123	0,112	0,068
ПБСМ95+МФ100+A185	0,119	0,108	0,066

Активно використовується в Україні система електропостачання змінного струму 27,5 кВ з екрануючими та підсилюючими проводами (ЕУП) успішно функціонує протягом майже десяти років. Серед переваг цієї системи можна відзначити низький опір тягової мережі, можливість розташування підстанцій на відстані до 100 км, підвищену надійність та знижений електромагнітний вплив на сусідні споруди. Є всі підстави вважати, що ця система знайде широке застосування на більшості залізниць.

Останнім часом особливо актуальною стала тема визначення втрат енергії у тяговій мережі. При техніко-економічних розрахунках споживання електроенергії при існуючій системі обліку загалом використовують виміряні та розраховані приблизні значення. Відсоток втрат у тяговій мережі в цих розрахунках приймається орієнтовно, оскільки точне значення втрат енергії неможливо визначити за допомогою лічильників енергії у тяговій мережі. Немає сумнівів, що змінюючи обсяги споживання енергії на тягу, власні потреби підстанцій теж можна врахувати для вирішення будь-яких проблем при складанні загального енергетичного балансу.

$$d_w = W_T - W_{\text{erc}}$$

У даному питанні мають місце так звані «умовні» втрати, організаційно-економічні недоліки різних служб та підрозділів залізниць. У таких умовах на деяких дорогах втрати в тяговій мережі змінного струму оцінюють величиною 10...15 %, тоді як реальні втрати енергії в середньому становлять 3...5 %. Ускладнює ситуацію і те, що на даний момент не існує достовірного методу розрахунку системи електропостачання з ЕУП, що ставить завдання з розробки такого методу на перший план. Наявність додаткових підсилювального та екрануючого проводів викликала появу додаткових індуктивних зв'язків між ними та контактною мережею та рейкою. А враховуючи, що контактні дроти

мають у деяких місцях знос вищий за нормативний, то зовсім виходить, що опорами з довідників користуватися не можна через можливі великі похибки. Рейкова мережа також змінена, з урахуванням наявності заземлювачів і шляхів струмів у різних режимах можуть бути різними. На практиці помічені випадки протікання струму в дроті, що екранує, при відключеному живленні зони. Це пояснюється існуванням землі блокуючих струмів, які також впливають на втрати в системі.

Визначення втрат енергії у тяговій мережі стають особливо актуальними останнім часом через обмеженість енергоресурсів і зростаючу проблему раціонального та економічного використання енергії, включаючи електричну. Основним споживачем електричної енергії на залізничному транспорті є електричний потяг. За своєю природою тягове навантаження відрізняється від нетягового тим, що одночасно переміщується у просторі та змінюється у часі. Задача визначення та прогнозування втрат у тяговій мережі набула особливої актуальності.

Важливість прогнозування втрат, а також енергії, визначається потребою в розвитку оптового ринку електроенергії через включення у нього тягових споживачів. Під час техніко-економічних розрахунків використовуються виміряні та розраховані значення електроспоживання. У цих розрахунках відсоток втрат у тяговій мережі приймається орієнтовним, оскільки точне визначення втрат енергії за існуючою системою обліку неможливе. Це надає можливість варіювати обсягами споживання електроенергії на тягу, що вирішує проблеми під час складання загального енергетичного балансу. У результаті так звані "умовні втрати" приписуються організаційно-економічним недолікам та недоробкам різних служб і структурних підрозділів залізниць.

У зазначених умовах на деяких ділянках мережі змінного струму втрати оцінюються приблизно на рівні 10...15 %, що призводить до фактичних втрат у межах 3...5 %.

Для вирішення цих проблем запропоновано використовувати спеціальну програму при визначенні та прогнозуванні втрат, яка дозволяє моделювати тягове навантаження. Важливо відзначити, що застосування стандартних моделей, таких як Electronics Workbench, не дозволяє отримати необхідний результат, оскільки вони не враховують процес переміщення навантаження. При моделюванні руху поїзда по ділянці доводиться моделювати кожну миттєву схему окремо. Це є надто незручним, адже зменшення кількості миттєвих схем призводить до збільшення похибки розрахунку.

Цих недоліків позбавлена спеціальна модель, у якій тягове навантаження сприймається як динамічний процес. Ядром моделі, її основою є рішення миттєвих схем за допомогою матричного методу, який дозволяє розраховувати миттєві схеми будь-якої складності. Таким чином, програма поєднує матричний метод розрахунку з динамічним методом. Результатом виконання покрокових розрахунків є миттєві значення втрат потужності, при інтегруванні яких за часом, що дорівнює кроку розрахунку, виходить значення втрат енергії:

Дана модель усуває зазначені недоліки, представляючи тягове навантаження як динамічний процес. Основою цієї моделі є розв'язання миттєвих схем за допомогою матричного методу, який дозволяє розраховувати миттєві схеми будь-якої складності. Таким чином, програма комбінує матричний метод розрахунку з динамічним методом. Результатом проведених поетапних розрахунків є миттєві значення втрат потужності, інтегруючи які за часом (рівним кроці розрахунку), отримуємо значення втрат енергії, що показано на рисунку 2.1.

Програма має вбудований довідник параметрів елементів тягової мережі. При виборі необхідної марки елемента з запропонованого списку, автоматично змінюються параметри цього елемента. Процес складання матриць є повністю автоматизованим. Для побудови матриць опору Z використовуються формули Ф. Полячека.

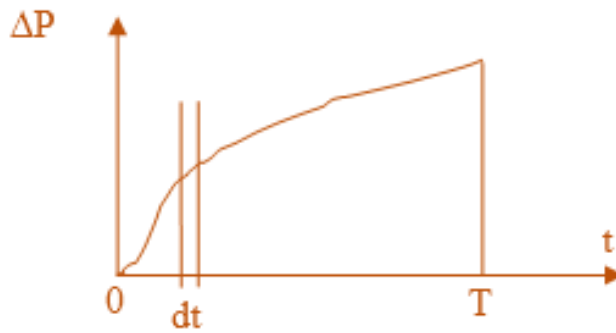


Рисунок 2.1 – Зміна миттєвих втрат потужності у часі

$$\Delta W = \int_0^T \Delta P dt$$

Так, наприклад, еквівалентний опір чотирьох рейок двоколійної ділянки розраховується за формулою [17]:

$$z_{pII} = \frac{r_{pa}}{4} + 0,05 - j \cdot 0,144 \left[1,53 - 5,2 \frac{r_{pa}}{4} + \lg \left(\sqrt[4]{Ra_p a_m^2} \cdot \sqrt{\sigma} \right) \right]$$

де r_{pa} - активний опір рейки, Ом/км;

R - еквівалентний радіус рейки, м;

a_p - Відстань між рейками, м;

a_m - ширина міжколії, м;

σ - провідність землі, См/м.

Враховуючи опір взаємоіндукції між елементами тягової мережі змінного струму (рис. 2.2), формування матриць Z_v , які враховують цю взаємоіндукцію. Для двоколійної ділянки змінного струму повний опір між контактними підвісками 2-х шляхів визначається відповідно до [21, 24] за формулою:

$$\underline{Z}_{T\phi 1T\phi 2} = \underline{Z}_{T1T2} - \frac{\underline{Z}_{T1P} \cdot \underline{Z}_{T2P}}{\underline{Z}_{P3}}$$

де $\underline{Z}_{T\phi 1T\phi 2}$ - повний опір між контактними підвісками 2-х шляхів;

\underline{Z}_{T1P} , \underline{Z}_{T2P} – опір контурів контактна підвіска – рейка для кожного шляху;

\underline{Z}_{T1T2} - Опір взаємодукції між контурами контактна підвіска-рейка 1-го шляху та контактна підвіска - рейка 2-го шляху;

\underline{Z}_{P3} – опір контуру рейок – земля.

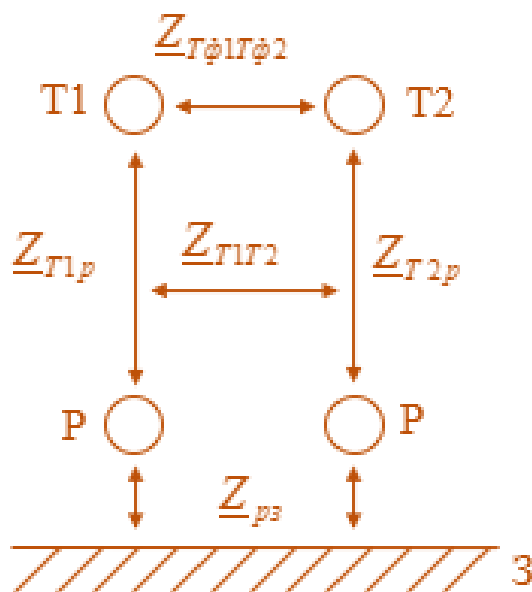


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема до визначення повного опору:

T1, T2 – контактні підвіски 1-го та 2-го шляхів; P – рейки; 3 – земля

Один з режимів розрахунків - це кроковий режим. За замовчуванням прийнято, що крок дорівнює 1 хвилині. Крок розрахунку може мати значення 0.1, 0.5, 1, 2, ... 10. Під кроком розуміється зміщення поїздів, які знаходяться в розрахунковій зоні, на відстань, що відповідає значенню кроку розрахунку та швидкості поїзда. За необхідності на цьому етапі часу можуть бути змінені такі параметри поїзда, як струм і швидкість руху. Крім крокового передбачення, режим пакетного пропуску передбачає прохід заданої кількості поїздів із

визначеним інтервалом часу. Цей режим можна використовувати для визначення тенденції зміни споживання електроенергії та втрат в тяговій мережі у часі.

За допомогою режиму побудови графіка руху поїздів (ГДП), можна проводити розрахунки на основі реально існуючого ГДП. Це дозволяє, маючи офіційний документ, визначити втрати в тяговій мережі, кількість спожитої електроенергії за певний період і мінімальну напругу на струмоприймачі електровоза. Використовуючи зазначений режим, можна аналізувати, як зміна ГДП впливає на витрати енергії і втрати.

Планована похибка при розрахунках становить приблизно 3%. На двоколійних ділянках змінного струму при відключенні одного зі шляхів можна визначити максимальну наведену напругу на іншому шляху. Використовуючи цю можливість, у майбутньому можна буде оцінити рівень впливу тягового навантаження на лінії зв'язку, прокладені вздовж електрифікованої ділянки.

Особливу увагу слід приділити ймовірнісному режиму, рекомендованому для використання у випадку, коли графік руху поїздів не відомий, але відомі ваги поїздів та заплановані розміри руху. У такому випадку протягом вказаного періоду поїзд виконує випадковий процес запуску з урахуванням загальної кількості поїздів та кількості поїздів кожного типу. Цей режим корисний для оцінки значення витрат енергії та втрат у тяговій мережі. Для більш точної оцінки необхідно проводити імітацію кілька разів, а потім порівнювати результати розрахунків для отримання необхідних висновків.

На даний момент наша увага зосереджена на міському електропоїзді, метрополітені та трамваї. Для кожного зазначеного типу рухомого складу вказуються межі зміни споживаного струму та швидкості руху. Перед запуском ЕРС випадковим чином визначаються його параметри, і далі відбувається імітація його руху з цими параметрами.

На поточному етапі швидкість і споживаний струм ЕРС за час його руху по розрахунковій зоні є постійними, але це не відображає реальної ситуації і буде

враховано в подальшому розвитку. Крім того, необхідно додати можливість розрахунку нових схем живлення, таких як ЕУП, і врахувати прокладання на опорах контактної мережі ліній поздовжнього електропостачання та проводів системи ДПР з можливістю виявлення впливу тягового навантаження на збільшення втрат у цих системах.

Для ілюстрації роботи програми розглянемо приклад.

Приклад 1. Є фідерна зона двоколіїної ділянки постійного струму завдовжки 24 км з тяговою мережею М-120 + 2МФ-100 + Р-75. Необхідно провести пакетний пропуск 5 поїздів по заданій ділянці та побудувати графіки втрат потужності з інтервалом у пакеті рухомого складу 7, 10 та 13 хвилин (таблиця 2.7).

Таблиця 2.7 – Результати розрахунку прикладу №1

№ п/п	Інтервал, хв	Споживана енергія, тис. кВт*год	Втрати енергії, тис. кВт*год	Втрати енергії, %
1	10	12,69	1,28	10,11
2	15	17,08	1,08	8,12
3	20	20,12	1,09	7,97

У графіку наведено залежність втрат енергії під час прокладання інтервалів у 7, 10 і 13 хвилин відповідно. Зауважимо, що зі збільшенням інтервалу попутного руху практично вдвічі втрати енергії зменшилися на 1,5 рази. Детальніше це можна визначити за рисунком 2.3.

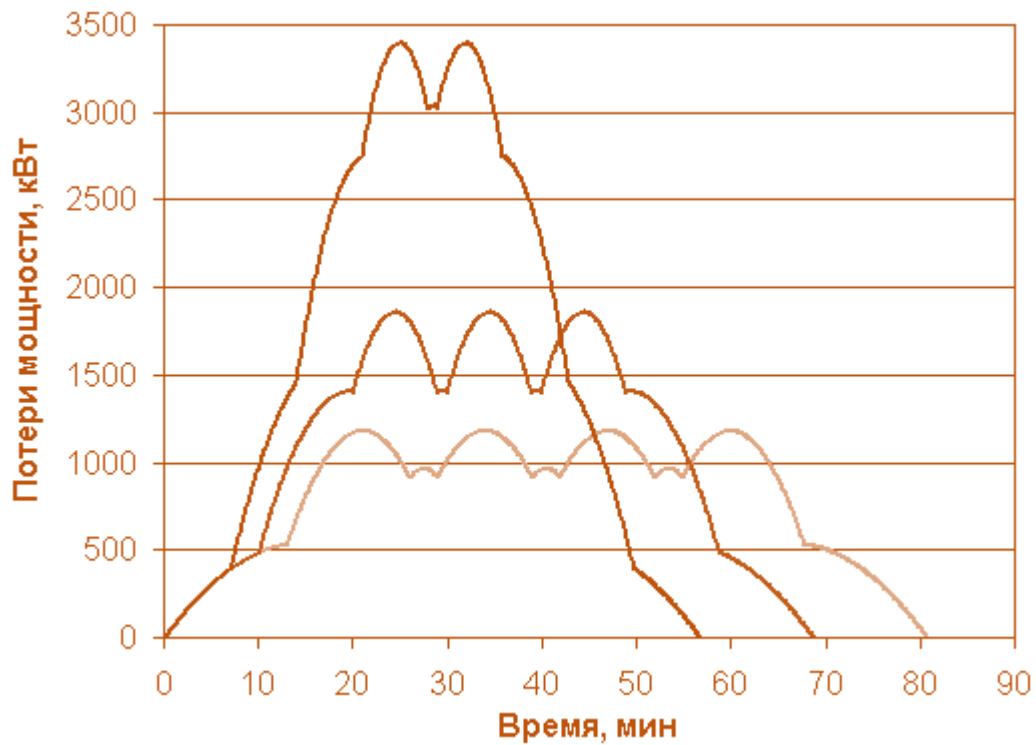


Рисунок 2.3 – Втрати потужності при пакетному пропуску ЕРС

Приклад 2. У розглянутому випадку є фідерна зона двоколійної ділянки змінного струму завдовжки 50 км з тяговою мережею ПБСМ-95 + МФ-100 + Р-65. Розглянемо сценарій, при якому проводиться пакетний пропуск 12 поїздів по двоколійній ділянці (по 6 на кожному шляху), а потім 6 поїздів по одному з колій, коли другий шлях вимкнений (таблиця 2.8).

Таблиця 2.8 – Результати розрахунку прикладу №2

№ п/п	Кількість поїздів	Споживана активна енергія, тис. кВт·год	Втрати активної енергії, тис. кВт·год	Втрати активної енергії %
1	12	79,26	3,48	4,12
2	6	38,57	1,39	3,78

У випадку пропуску по кожному з колій двоколійної ділянки 6

електричних поїздів спожита енергія вдвічі більша, ніж при пропуску 6 поїздів тільки одним шляхом, втрати активної енергії вищі більш ніж удвічі через наявність індуктивного зв'язку між підвісками кожного зі шляхів (рис. 2.4).

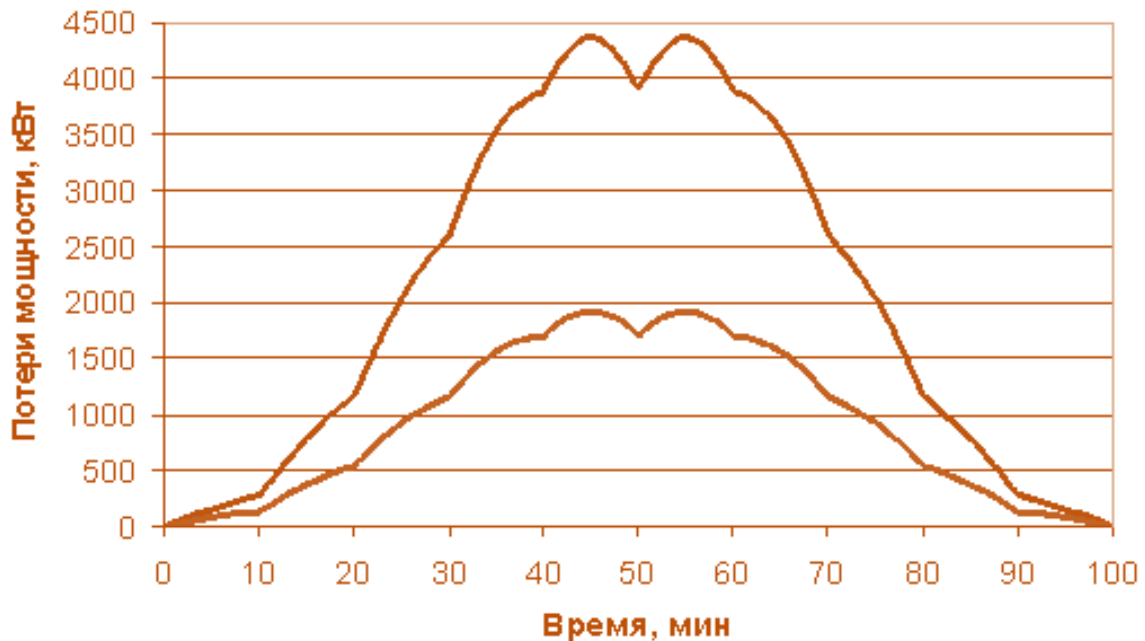


Рисунок 2.4 – Втрати потужності при роботі одного та двох шляхів

У прикладі 3 розглядається фідерна зона ділянки змінного струму завдовжки 50 км із тяговою мережею ПБСМ1-95 + МФ-100 + Р-65. За визначеним графіком руху поїздів необхідно встановити залежність активних втрат у тяговій мережі від часу протягом періоду трьох годин. З використанням ймовірного режиму імітації також визначається та сама залежність, що представлена у таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Параметри ЕРС

Тип	Кількість	Швидкість, км/год	Споживаний струм, А
Електропоїзд	1	70	300+j15
Трамвай	1	45	100+j10
Метрополітен	2	60	200+j20

В результаті роботи програми були отримані такі результати (рис. 2.5):

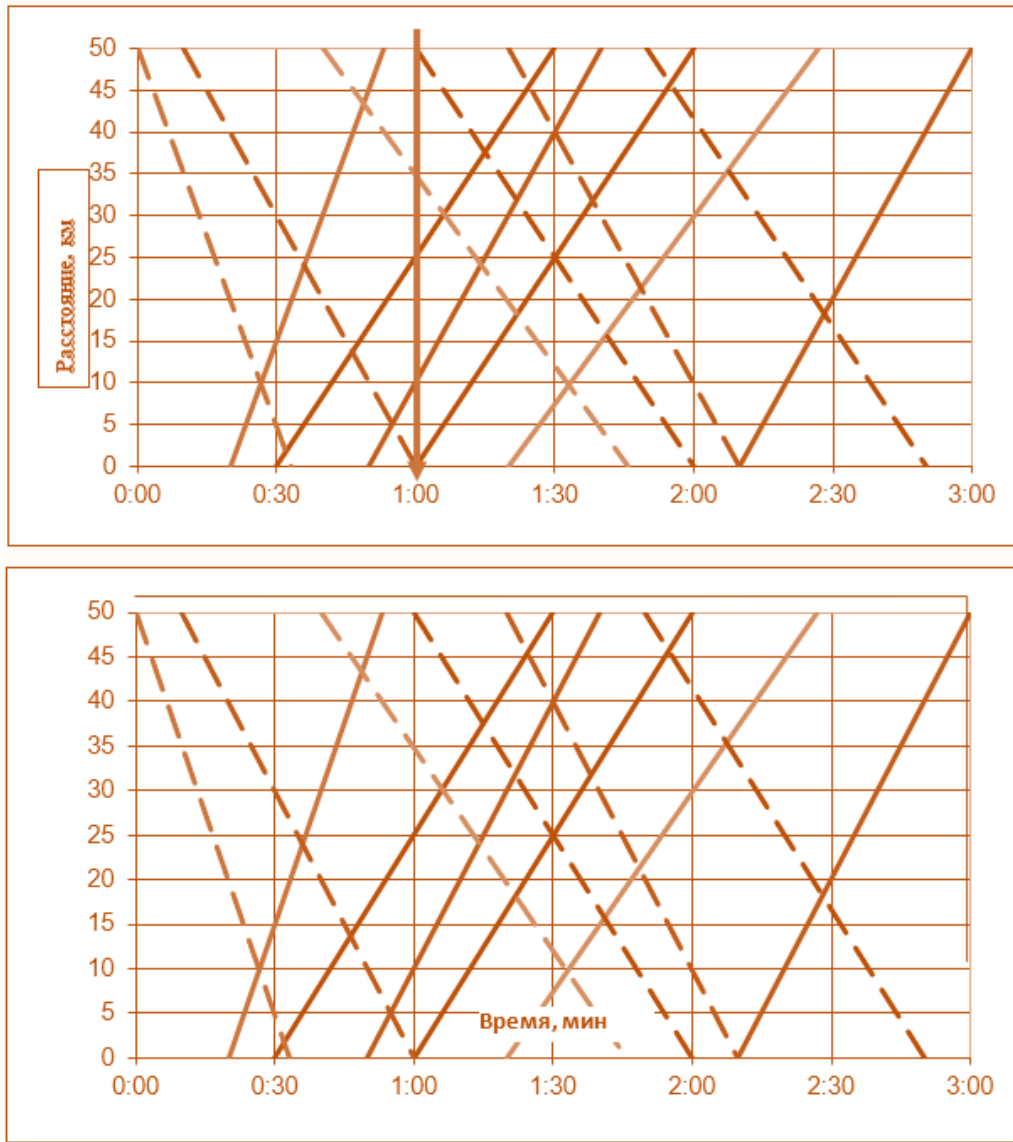


Рисунок 2.5 – Графік руху поїздів та втрати потужності

Вочевидь з останнього зображення розрахунків за ймовірнісним режимом за певних умов може повністю замінити розрахунки за виконаним графіком руху поїздів, оскільки області, обмежені кривими (втрати енергії), приблизно рівні. З цього випливає, що методику можна використовувати для прогнозування втрат енергії при відомих обсягах руху.

2.3 Параметри контактної мережі

Проаналізуємо залежність втрат енергії від витрат під час руху одиниці ЕРС. Для цього візьмемо одноколіїний відрізок постійного струму з підвіскою М-95 + 2МФ150 + А-120. ЕРС, що рухається із швидкістю 60 км/год, споживає струм 1000 А. Змінюючи довжину зони від 1 км до 30 км, визначимо коефіцієнт втрат, обчислимо втрати енергії, витрати енергії на рух ЕРС, а також коефіцієнт корисної дії.

$$\eta = \frac{W_{ДВ}}{W_{ОБЩ}} \cdot 100\%$$

де η – коефіцієнт корисної дії системи електропостачання,

$W_{ДВ}$ – витрати енергії на рух поїзда, тис. кВт · год,

$W_{ОБЩ}$ – загальна витрата енергії, тис. кВт · год.

Дані, отримані за допомогою програми Матрікс і вручну, зведемо в таблицю 2.10.

Таблиця 2.10 – Отримані результати [24]

Довжина ділянки а	Витрати енергії, тис. кВт · год	Коефіцієнт втрат, %	Витрати енергії на рух поїзда, тис. кВт · год	ККД, %
1	2	3	4	5
1	0.066	0.38	0.06283	99.56
2	0.12	0.63	0.11031	99.23
3	0.156	0.79	0.17256	99.20
4	0.23	1.11	0.22151	98.89
5	0.364	1.41	0.28014	98.59

Продовження 2.10

1	2	3	4	5
6	0.34	1.51	0.32462	98.37
7	0.39	1.9	0.37769	98.1
8	0.44	2.17	0.43045	97.83
9	0.50	2.54	0.48287	97.55
10	0.55	2.82	0.5351	97.29
11	0.61	2.87	0.58697	97.02
12	0.67	3.31	0.63848	96.74
13	0.72	3.62	0.68976	96.47
14	0.77	3.8	0.7407	96.2
15	0.825	4.11	0.79142	95.93
16	0.88	4.29	0.8417	95.65
17	0.935	4.62	0.89180	95.38
18	0.99	4.89	0.94159	95.11
19	1.045	5.17	0.99097	94.83
20	1.1	5.43	1.04027	94.57
21	1.16	5.71	1.08905	94.29
22	1.21	5.98	1.13764	94.02
23	1.27	6.25	1.18594	93.75
24	1.32	6.52	1.23394	93.48
25	1.38	6.79	1.28164	93.21
26	1.43	7.07	1.3281	92.93
27	1.49	7.34	1.37600	92.66
28	1.54	7.61	1.42281	92.39
29	1.60	7.89	1.46911	92.11
30	1.65	8.16	1.51536	91.84

За даними таблиці 2.10 побудуємо графік залежності ККД від довжини ділянки електропостачання (рис. 2.6).

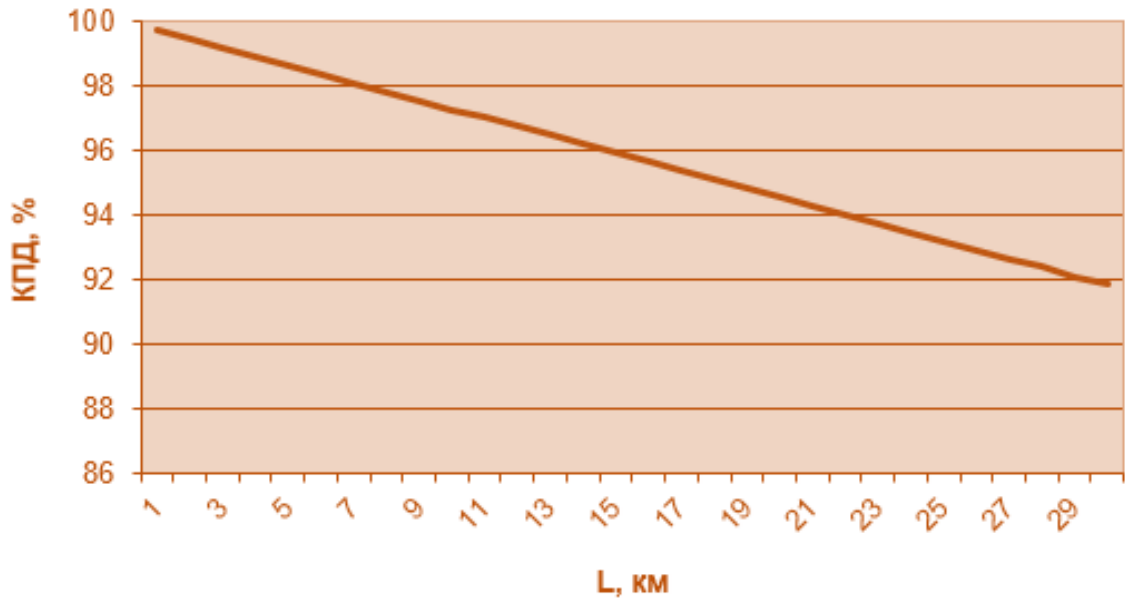


Рисунок 2.6 – Залежність ККД від довжини ділянки електропостачання

З графіка видно, що коефіцієнт корисної дії постійно зменшується, і визначити з його допомогою оптимальну довжину зони не вдасться. Тому ми вводимо поняття коефіцієнта неефективності, позначеного як K_n .

$$K_n = \frac{\Delta W_{\text{ОБЦ}}}{(W_{\text{ОБЦ}})^2} \cdot 10^3$$

де $\Delta W_{\text{ОБЦ}}$ – втрати енергії, тис. кВт · год.

Дані з розрахунку коефіцієнта неефективності наведено у таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Результати розрахунку коефіцієнта неефективності

Довжина ділянки	Витрата енергії, тис. кВт · год	Коефіцієнт втрат, %	Коефіцієнт неефективності
1	2	3	4
1	0.055	0.27	0.04909
2	0.11	0.54	0.04909
3	0.165	0.81	0.04909
4	0.22	1.09	0.04955
5	0.275	1.36	0.04946
6	0.33	1.63	0.04939
7	0.385	1.9	0.04935
8	0.44	2.17	0.04932
9	0.495	2.45	0.04950
10	0.55	2.71	0.04927
11	0.605	2.98	0.04926
12	0.66	3.26	0.04939
13	0.715	3.53	0.04937
14	0.77	3.8	0.04935
15	0.825	4.07	0.04933
16	0.88	4.35	0.04943
17	0.935	4.62	0.04941
18	0.99	4.89	0.04939
19	1.045	5.17	0.04947
20	1.1	5.43	0.04936
21	1.155	5.71	0.04944

Продовження таблиці 2.11

1	2	3	4
22	1.21	5.98	0.04942
23	1.27	6.25	0.04941
24	1.32	6.52	0.04939
25	1.38	6.79	0.04938
26	1.43	7.07	0.04944
27	1.49	7.34	0.04943
28	1.54	7.61	0.04942
29	1.60	7.89	0.04947
30	1.65	8.16	0.04946
31	1.71	8.43	0.04944
32	1.76	8.7	0.04943
33	1.82	8.97	0.04942
34	1.87	9.24	0.04941
35	1.925	9.52	0.04946
36	1.98	9.79	0.04944
37	2.035	10.06	0.04944
38	2.09	10.33	0.04943
39	2.145	10.6	0.04942
40	2.2	10.88	0.04946
50	2.75	13.6	0.04946

Побудуємо залежність коефіцієнта неефективності від довжини зони (рис. 2.7, 2.8).

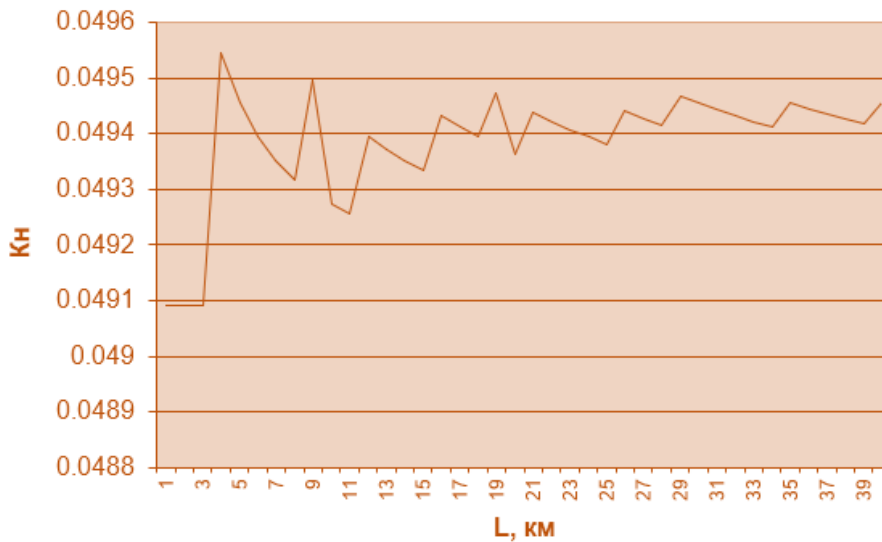


Рисунок 2.7 – Залежність коефіцієнта неефективності від довжини зони

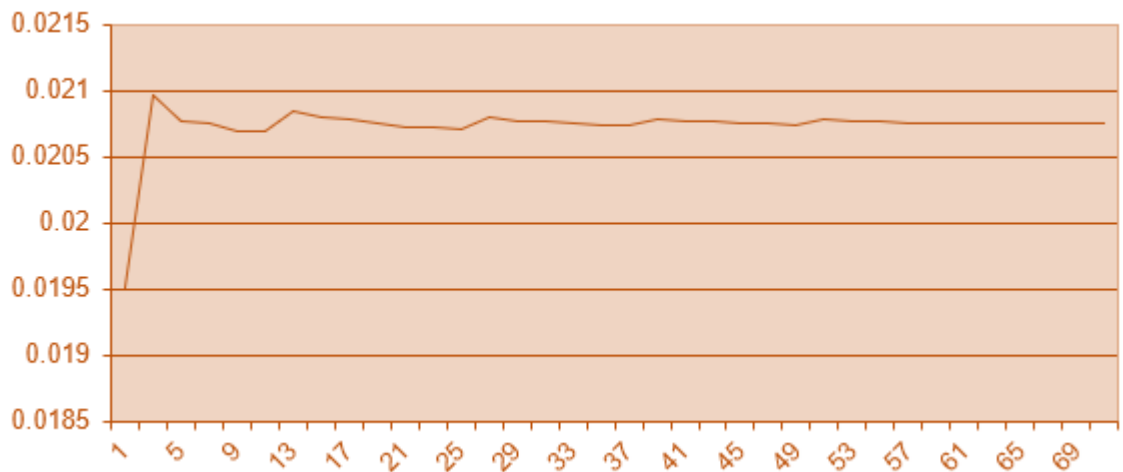
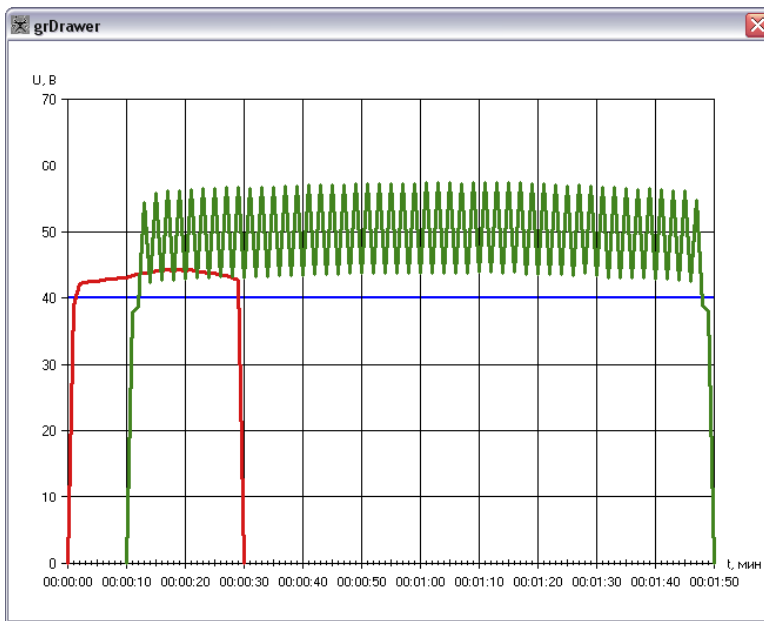


Рисунок 2.8 – Залежність коефіцієнта неефективності від довжини зони

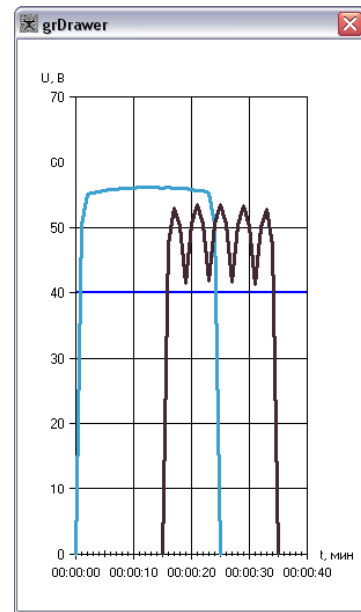
Враховуючи порівняння графіків (рис. 2.7 та рис. 2.8), стає очевидним, що використання енергії на змінному струмі є більш ефективним, ніж на постійному. При дослідженні залежності втрат енергії від опору, приходимо до висновку, що зі збільшенням перетину підвіски втрати знижуються, і ця залежність лінійна. Особливу увагу слід приділити опору рейкового ланцюга. Власний опір рейок впливає на втрати не так само, як і в контактній мережі, тому існує перехідний опір рейок-земля.

Досліджуючи втрати енергії від опору, слід зазначити, що при збільшенні сідчення підвіски втрати зменшуються, а ця залежність є лінійною. Особливу увагу слід приділити опору рейкового ланцюга. Власний опір рейок впливає на втрати, але не так само, як і в контактній мережі. Тому існує перехідний опір рейок-земля, який грає значущу роль. Збільшення цього опору призводить до того, що більшість струму починає протікати по рейках, що призводить до додаткових втрат в рейці та збільшення потенціалу рейки відносно землі (рис. 2.8).

Збільшення втрат енергії виявляється нелінійно. На рисунку 2.9 представлена залежність зміни втрат енергії (%) від перехідного опору рейок-земля ($\Omega/\text{км}$).



а



б

Рисунок 2.8 – Небезпечні потенціали системи «рейки-земля» [25]

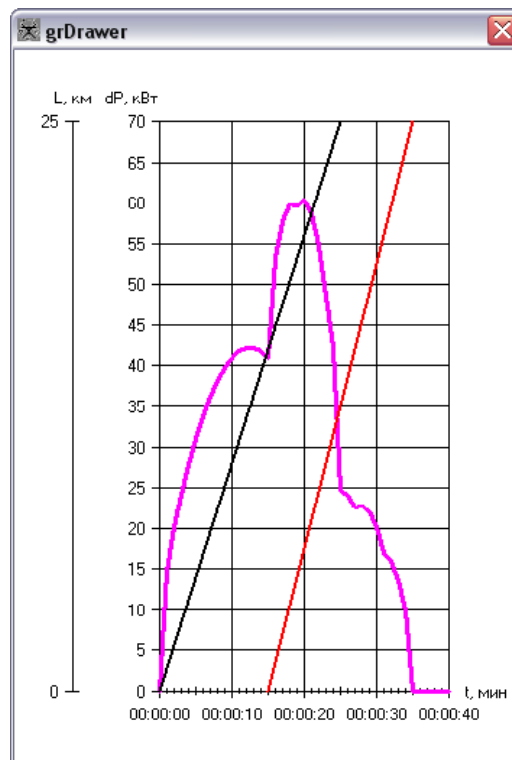


Рисунок 2.9 – Втрати потужності під час руху ЕРС [25]

Висновки, які можна зробити після проведених досліджень, включають наступне: зменшення будь-якої компоненти системи електропостачання призводить до зниження загальних втрат енергії. На перший погляд може здатися, що найбільший (лінійний) ефект можна досягти, зменшивши опір контактної мережі. Проте виявляється, що це впливає менш виразно, ніж опір рейкового ланцюга та перехідний опір рейок-земля. Це дає змогу зробити наступні практичні висновки:

- для зменшення втрат енергії рекомендовано переходити на систему електропостачання з використанням екрануючого та підсилюючого дроту (власний опір підвіски);
- зменшення перехідного опору не завжди є оптимальним рішенням, оскільки у рейці можуть протікати не лише тягові струми;
- заміна стикових перемичок на рейках, застосування рейок більшої довжини та ревізія колії – ці заходи можуть сприяти зниженню втрат на кілька відсотків (2...5 %). (Нелінійна залежність). Крім того, цей захід покращує безпеку.

3 ЗАХОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

3.1 Підвищення енергоефективності міського ЕРС

Поширеним явищем є нерівномірність напруги на суміжних тягових підстанціях в міжпідстанційних зонах тягових мереж системи міського електричного транспорту. Це явище призводить до збільшення втрат електричної енергії через перерозподіл струму в контактних мережах. Підвищення енергетичної ефективності режимів роботи систем внутрішнього електропостачання при існуванні транзиту потужності через посередництво міжсистемних перетоків вимагає застосування автоматичного регулювання напруги на тягових підстанціях і впровадження в роботу раціональних компенсуючих пристроїв для енергопостачальних ліній тягових підстанцій [10...14].

Енергетична мережа є складною системою з великою кількістю вузлів, де входами і виходами є потоки активних та реактивних потужностей, а також величини напруги і струму (рис. 3.1). Співвідношення між активною і реактивною потужністю і електротехнічними параметрами кожної гілки мережі змінюються в залежності від її структури [13, 15...17]. Існує важливий параметр, що визначає ефективність передачі енергії в системі, і його називають «середній шлях енергії».

Підвищення енергетичної ефективності системи тягового електропостачання міського електричного транспорту може бути досягнуто найбільш результативно за допомогою підвищення напруги електроенергії, що надається на вхід тягових підстанцій. У цьому контексті існує можливість використання ряду нетрадиційних рішень. Наприклад, за зарубіжним досвідом успішно використовується напруга 20 кВ змінного струму для живлення тягових

підстанцій міського електричного транспорту (Європа, США, Канада). Також розглядається можливість впровадження напруги живлення тягових підстанцій на рівні 35 кВ. Втім, така система вимагає розробки нових типів міського транспорту, трансформаторів підстанцій та іншого обладнання.

У сфері проектування та конструювання рухомого складу міського електротранспорту ефективним рішенням є вдосконалення конструкції силових напівпровідникових перетворювачів енергії і їх систем охолодження, а також використання асинхронних приводів і сучасних систем керування тяговими приводами. Цей резерв може складати до 5% економії електроенергії електротранспорту.

Протягом багатьох років в межах країни було побудовано і експлуатувалися системи електропостачання міського електротранспорту. Зрозуміло, що сучасна елементна база зараз значно покращена за своїми технічними характеристиками. Будівництво енергосистем базувалося на плануванні міст, обумовлювалося кількістю рухомого складу, його характеристиками, особливостями маршрутів тощо [27]. Однак з часом пасажиропотоки та технічні характеристики ЕРС значно змінилися, тому виникла необхідність у вирішенні питань найбільш ефективного використання вже діючої системи електропостачання в сучасних умовах експлуатації міського електротранспорту [28]. Аналіз електропостачання міського електричного транспорту свідчить, що цей вид транспорту потребує, по-перше, оцінки ефективності використання електроенергії за існуючим порядком експлуатації, і, по-друге, розробки організаційно-технічних заходів щодо зменшення енергоспоживання з їх економічною оцінкою.

Система управління енергоспоживанням, яка раніше входила до складу економічної моделі міського електротранспорту, була орієнтована на збільшення валових показників і не сприяла впровадженню енергозберігаючих технологій чи пошуку шляхів досягнення заданих обсягів пасажирських перевезень з меншими

витратами матеріальних, фінансових та енергетичних ресурсів. Такому становищу також сприяли адміністративно встановлені співвідношення між складовими експлуатаційних витрат і, зокрема, низькі тарифи на електроенергію [28...30]. Нині існує необхідність перегляду цієї системи та впровадження нових підходів для забезпечення більш ефективного та сталого енергоспоживання в міському електротранспорті.

На підставі аналізу проведених досліджень та компонентів витрат енергії, що було виконано при оцінці її ефективності, можуть бути запропоновані такі рішення:

- перегляд маршрутів;
- раціональне розподілення рухомого складу на маршрутах;
- перегляд розташування зупинок з ліквідацією нераціонально розміщених та з малим пасажиропотоком;
- зміна схеми електропостачання, використання підсилюючих кабелів, проводів, реконструкція тягових підстанцій для зниження втрат напруги і т. п.

В умовах зміни тарифів і вартості ресурсів, оцінку ефективності використання енергії та економічну ефективність цих заходів слід проводити в натуральному обчисленні. Таким чином, основним показником ефективності енергоспоживання слід вважати питомі витрати, тобто витрати електроенергії на одиницю пробігу рухомого складу.

Для проведення аналізу ефективності фактичного використання електроенергії використовуються вихідні дані, що реєструються службою електрогосподарства. Ці дані включають інформацію про споживану енергію, включаючи витрати енергії на внутрішні потреби підстанцій. Також використовується інформація від служби руху, яка надає дані про виконані пробіги рухомих складових за різними маршрутами, типами та видами рухомого складу, а також відповідні частоти їх руху. Процес формування вихідних даних

розпочинається з аналізу маршрутної системи та схеми електропостачання. На кожному районі живлення виділяють рухомі одиниці за типами та визначають середньорічні значення частоти їх руху в годинах пік.

Для систематизації даних приймається така система індексів: t - позначення виду або типу рухомого складу, зокрема $t1$ – трамвайні вагони Т-3; $t2$ – трамвайні вагони Т6А5, $t3$ – трамвайні вагони Т6В5, M - позначення маршруту; $q = 1, 2, \dots, 12$ - позначення місяця року, j - позначення району живлення, m - позначення ділянки живлення, E – витрати енергії, кВт·год, $E1$ – витрати енергії на власні потреби, кВт·год, $T1$ - середньомісячна температура, °С. Накладанням на маршрутну систему схеми електропостачання виділяються райони живлення за кількістю тягових підстанцій.

Неоднорідність паралельно працюючих мереж 220, 110, 35, 10 кВ, особливо в періоди спаду пасажиропотоку і перерозподілу навантажень у розподільних мережах середньої напруги, зводить до мінімуму переваги замкнутих мереж електропостачання. Ці переваги включають в себе більшу надійність, кращу якість електроенергії і більшу економічність. У деяких випадках перетоки потужності в лініях можуть досягати величин, що несумісні з надійністю цієї лінії (нагрівання) або системи (стійкість), і вимагають диспетчерського регулювання.

З метою проведення аналізу ефективності використання електроенергії у неоднорідних замкнутих мережах розглянемо простий випадок неоднорідного замкнутого кола, яке складається з двох паралельних гілок з відповідними опорами:

$$\underline{Z}_1 = r_1 + jx_1 \text{ та } \underline{Z}_2 = r_2 + jx_2.$$

Це може відповідати практичній ситуації, коли до мережі з однаковою напругою підключена лінія більш високої напруги з відповідними опорами. У цьому випадку струм через одну з гілок може бути обмежений у разі нагріву проводів. Однак важливо врахувати, що вітка з більш високою напругою та

відповідними опорами може не мати необхідного ефекту у підвищенні пропускної здатності мережі.

Внаслідок невідповідності індуктивних опорів віток їх активним опорам може виникнути зниження пропускної здатності мережі. Розподіл навантажень у мережі стає невігідним, оскільки одна з віток повністю завантажена, тоді як інша практично не має навантаження. Такий розподіл навантажень є неекономічним за умов експлуатації мережі.

У неоднорідній мережі відбувається протікання більшого активного струму через вітку з меншим реактивним опором, а також із більшим активним струмом. Це одночасно призводить до значних втрат активної потужності та напруги. Важливо відзначити, що неоднорідність мережі не завжди має місце і залежить від взаємного розташування навантажень і джерел живлення в мережі. Найбільш виразно неоднорідність проявляється у випадках передачі великої транзитної потужності в мережі з паралельно підключеними (через трансформатори) ділянками різних напруг. Неоднорідність тягових і живильних мереж енергосистем призводить до збільшення еквівалентного активного опору R_e на шляху передачі енергії.

Враховуючи реальні значення опорів, розрахунки дозволяють зробити висновок, що при паралельній роботі мереж 110 і 10 кВ, а також 220 і 35 кВ, слід очікувати збільшення еквівалентного опору на 15–20%. Таким чином, втрати потужності збільшаться на 15–20%. В загальному випадку для підвищення економічності роботи неоднорідної мережі можуть бути застосовані такі заходи:

- ділення мережі на рівні напруги;
- застосування поздовжньо-ємнісної компенсації у лініях вищої напруги;
- включення вольтододаткових трансформаторів у ланцюги зв'язку мереж різної номінальної напруги;
- оптимальне рішення визначається шляхом техніко-економічних

розрахунків на імітаційних моделях з урахуванням режимів роботи живильних енергосистем.

Актуальним аспектом забезпечення енергобезпеки процесу перевезень залишається ефективна реалізація тягової електроенергетичної резервної потужності електропостачання тягових мереж міського електротранспорту. Існують різні напрямки реалізації резервної потужності. У країнах з розвинутою економікою основним шляхом на міському транспорті є розміщення стаціонарних тягових резервних агрегатів на тягових підстанціях, тоді як для міського електротранспорту України це питання пропонується вирішувати за допомогою пересувних резервних тягових підстанцій. Останні можна вводити в експлуатацію під час стійкого зростання обсягу перевезень. У разі зменшення перевезень вони можуть бути задіяні на інших напрямках, де очікується зростання обсягів перевезень. Зрозуміло, що така "гнучка" система резервування повинна бути взаємопов'язана зі схемами та режимами системи зовнішнього електропостачання.

Системний аналіз енергоефективності зовнішнього електропостачання тягових підстанцій м. Дніпро виявив загальний недолік схем приєднання тягових мереж міського електротранспорту, який полягає в тому, що частина тягових підстанцій приєднана до мережі 6 кВ, а частина до 10 кВ, і деякі тягові підстанції мають вводи одночасно на 6 кВ та 10 кВ. Явище перетоків потужності тяговими мережами, як правило, залежать від зовнішнього електропостачання. Проте тягові мережі міського транспорту також вносять свій вплив, коли перерозподіляють перетоки. При великій кількості трамваїв або тролейбусів на фідерній зоні чистого перетоку може і не відбутися. Але при відсутності ЕРС на фідерній зоні або їхній невеликій кількості переток буде йти максимального значення. У цьому випадку необхідно розробити алгоритми швидкої оцінки перетоків потужності по тяговій мережі міського електротранспорту.

Робота паралельно працюючих електричних мереж з напругою 0,6 кВ, 10

кВ або 35 кВ виявляє їх різномірність, а передача потужності через них супроводжується зростанням втрат як активної потужності, так і електричної енергії. Отже, спостерігається зниження економічної ефективності роботи систем електропостачання в цілому.

Процеси еквівалентних перетворень схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання для розрахунку перетоків потребують моделювання навантажень цих систем міського електротранспорту. Однак енергосистема представлена значно складнішими схемами та розгалуженістю, ніж система внутрішнього електропостачання, тому моделювання її є викликом. Крім того, режими роботи сонячних електростанцій не є постійними, а постійно змінюються залежно від годин доби, місяців і років. З огляду на таку невизначеність, докладне моделювання зовнішнього електропостачання для визначення перетоків потужності та розрахунку втрат електроенергії у тяговій мережі міського електротранспорту має сенс лише в надзвичайних випадках досліджень і прогнозів.

3.2 Техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів

Розрахунок відсотка втрат електроенергії у тяговій мережі

Втрати електроенергії у тяговій мережі визначають за формулою:

$$\Delta W_T = \frac{r \cdot l \cdot W_T^2 \cdot 10^3}{U^2} \cdot \left(2,2 \cdot \alpha \cdot \frac{N_0}{N \cdot n} + \frac{n-1}{n} \right),$$

де ΔW_T – втрати електроенергії в міжпідстанційній зоні тягової мережі за час T ,

кВт год;

W_T – витрати електроенергії на тягу поїздів у цій зоні за час T , кВА год;

l - Довжина міжпідстанційної зони, км ;

r - Активний опір 1 км тягової мережі, км;

U - Середня напруга в контактній мережі, В;

N_0 - Пропускна здатність ділянки за час T , поїздів;

N - Розміри руху за час T , поїздів;

n - максимальна кількість поїздів у міжпідстанційній зоні;

α - відношення часу ходу поїзда в міжпідстанційній зоні до часу ходу під струмом. Приймають $T = 24$ год (добу), $\alpha = 1, 2$.

Річні втрати електроенергії рівні:

$$\Delta W_{\Gamma} = 365 \Delta W_T = 1,27 \cdot \frac{r \cdot l \cdot W_T^2 \cdot 10^3}{U^2} \cdot \left(2,2 \cdot \alpha \cdot \frac{N_0}{N \cdot n} + \frac{n-1}{n} \right)$$

Активний опір тягової мережі 1×25 кВ дорівнює $r = 0,132$ Ом/км, а ЕУП – $r = 0,071$ Ом/км [28].

Надалі матимемо на увазі наступне співвідношення:

$$T = N_0 \cdot \Theta \quad t = \frac{l}{V} \quad n = \frac{t}{\Theta} = \frac{l}{V \cdot \Theta}$$

де Θ - інтервал попутного прямування;

V - середня швидкість поїзда, км/год.

$$W_T = \frac{w_{\Gamma} \cdot l}{365 \cdot k},$$

де w_{Γ} – середньорічне питоме електроспоживання на 1 км експлуатаційної довжини головних шляхів, кВт год/км.

k – коефіцієнт потужності електровоза.

Відсоток втрат електроенергії в тяговій мережі дорівнює:

$$P_e = \frac{\Delta W_T}{W_T} \cdot 100 = \frac{r \cdot l \cdot W_T \cdot 10^3}{12 \cdot T \cdot U^2} \cdot \left(2,2 \cdot \alpha \cdot \frac{N_0}{N \cdot n} + 1 - \frac{1}{n} \right) \cdot 100$$

Тоді:

$$PЗ = \frac{22,83 \cdot r \cdot l \cdot w_T \cdot V}{N \cdot U^2 \cdot k_M} \left(2,2 \cdot \alpha \cdot \frac{N_0}{N} + \frac{l}{V \cdot \Theta} - 1 \right)$$

Для середніх умов: $\Theta = 0,166$ год; $\alpha = 1,2$; $V = 60$ км/год; $U = 25$ кВ, у таблицях 4.1 та 4.2 наведені відсотки втрат електроенергії в тяговій мережі 1×25 кВ та у тяговій мережі з ЕУП відповідно.

Таблиця 4.1 – Відсоток втрат ел.енергії у тяговій мережі (т.с.) 1×25 кВ

Ступінь пропуск спром. N/No	Відсоток втрат електричної енергії у т.с. 1×25 кВ при питомому електроспоживанні тис. кВт год/км та $l = 38$ км							
	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
0,1	0,569	1,138	1,707	2,276	2,845	3,414	3,983	4,553
0,2	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	2,239	2,559
0,3	0,237	0,474	0,711	0,947	1,184	1,421	1,658	1,895
0,4	0,195	0,391	0,586	0,781	0,977	1,172	1,367	1,563
0,5	0,17	0,341	0,511	0,682	0,852	1,023	1,193	1,363
0,6	0,154	0,308	0,461	0,615	0,769	0,923	1,077	1,231

Таблиця 4.2 – Відсоток втрат ел.енергії у тяговій мережі (т.с.) з ЕУП

Ступінь пропуск спром. N/No	Відсоток втрат електричної енергії у т.с. з ЕУП при питомому електроспоживанні тис. кВт год/км та $l = 38\text{км}$							
	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
0,1	0,306	0,612	0,918	1,224	1,530	1,837	2,143	2,449
0,2	0,172	0,344	0,516	0,688	0,860	1,032	1,205	1,377
0,3	0,127	0,255	0,382	0,510	0,637	0,764	0,892	1,019
0,4	0,105	0,210	0,315	0,420	0,525	0,630	0,736	0,841
0,5	0,092	0,183	0,275	0,367	0,458	0,550	0,642	0,733
0,6	0,083	0,165	0,248	0,331	0,414	0,496	0,579	0,662

Результати розрахунків відсотка втрат представлені у вигляді графіків на рисунках 4.1 та 4.2.

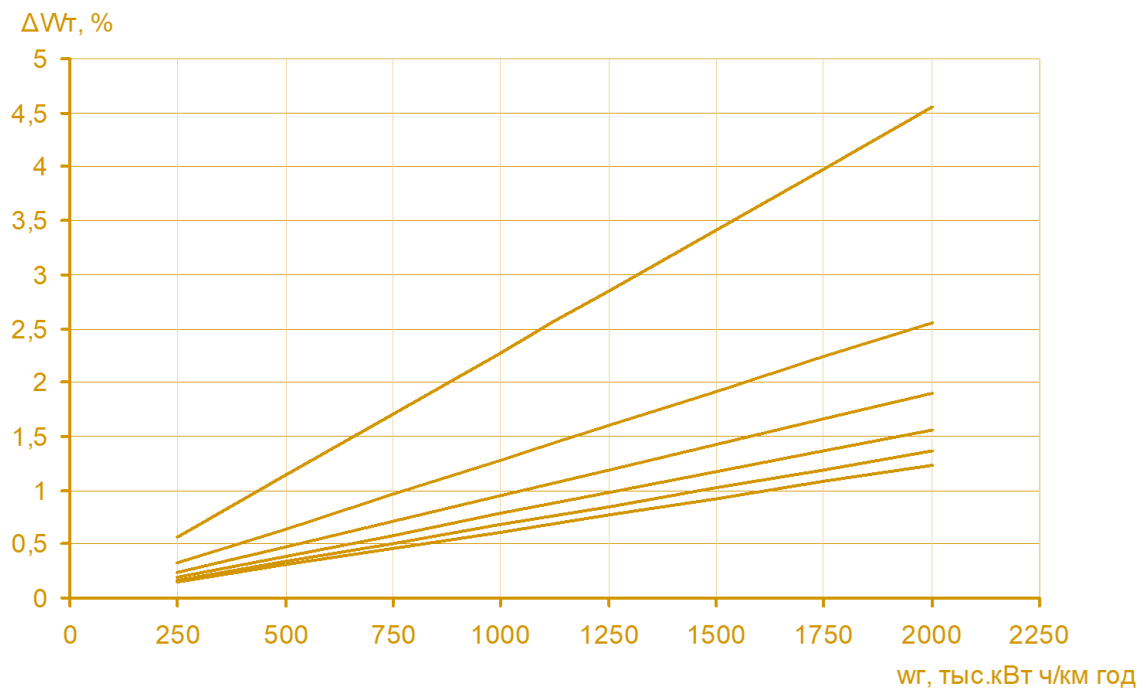


Рисунок 4.1 – Графік відсотка втрат електроенергії у тяговій мережі 1 по 25 кВ

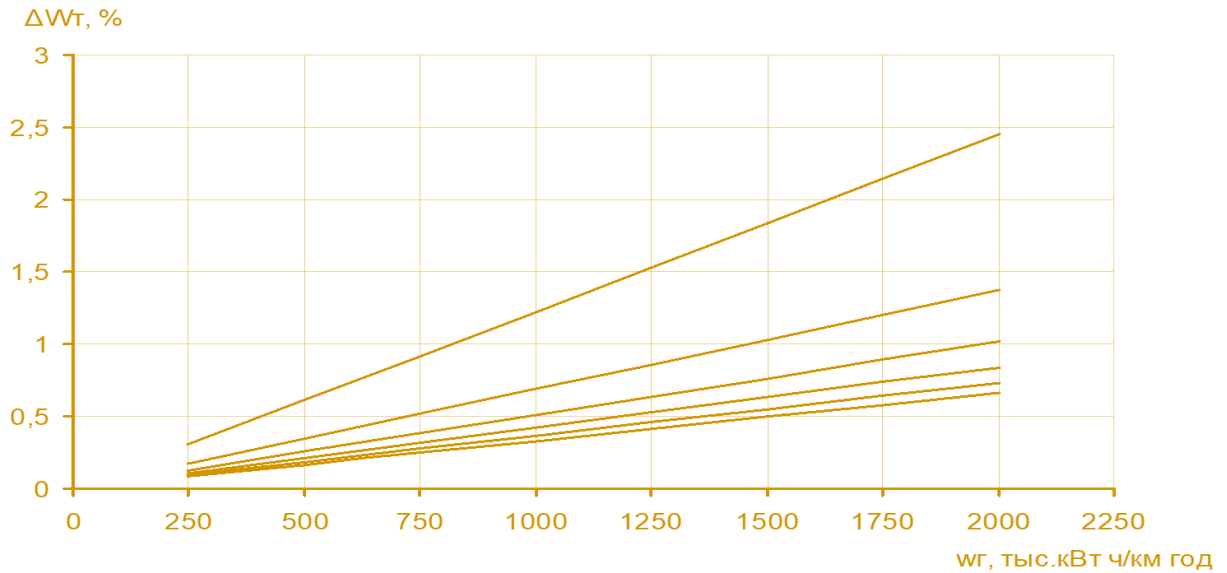


Рисунок 4.2 – Графік відсотка втрат електроенергії в тяговій мережі з екрануючим і підсилюючим проводом

Зіставлення графіків вказує на те, що процент втрат електроенергії в тяговій мережі з екрануючим і підсилюючим проводом за однакових умов значно менший, ніж у тяговій мережі 1 під напругою 25 кВ, перевищуючи його більш ніж удвічі.

Економія електроенергії.

$$\Delta W_T = \frac{r \cdot l \cdot W_T^2 \cdot 10^3}{12 \cdot T \cdot U^2} \left(2.2 \cdot \alpha \cdot \frac{N_0}{N \cdot n} + 1 - \frac{1}{n} \right) = \frac{r \cdot l \cdot W_T^2 \cdot 10^3}{12 \cdot T \cdot U^2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \left(2.2 \cdot \alpha \cdot \frac{N_0}{N} + n - 1 \right)$$

За інших рівних умов втрати електроенергії прямопропорційні опорі r .
 При $r = r_1$ маємо $\Delta W_T = \Delta W_{T1}$, при $r = r_2$ маємо $\Delta W_T = \Delta W_{T2}$.

$$\text{Очевидно: } \frac{\Delta W_{T1}}{\Delta W_{T2}} = \frac{r_1}{r_2} \quad \text{або} \quad \Delta W_{T2} = \Delta W_{T1} \frac{r_2}{r_1} .$$

При зниженні опорі тягової мережі с r_1 до r_2 економія електроенергії за

рахунок зниження втрат електроенергії за одну добу ($T = 24$ ч) складе:

$$\Delta W_T = \Delta W_{T1} - \Delta W_{T2} = \Delta W_{T1} \left(1 - \frac{r_2}{r_1} \right),$$

Економія електроенергії за рік на довжині 1 км дорівнюватиме:

$$\Delta E = 365 \cdot \frac{\Delta W_T}{l} = \frac{365}{l} \cdot \Delta W_{T1} \cdot \left(1 - \frac{r_2}{r_1} \right)$$

Витрата електроенергії на тягу поїздів W_T у між підстанційній зоні завдовжки l дорівнює за одну добу:

$$W_T = \frac{w_T \cdot l}{365 \cdot k_M} \cdot 10^3,$$

Підставимо (4.3) і (4.10) у вираз (4.7) при $r = r_1$:

$$\Delta W_T = \Delta W_{T1} = \frac{r_1 \cdot l \cdot \left(\frac{w_T \cdot l}{365 \cdot k_M} \right)^2 \cdot 10^9}{12 \cdot T \cdot U^2} \cdot \frac{\theta \cdot V}{l} \cdot \left(2.2 \cdot \alpha \cdot \frac{N_0}{N} + \frac{l}{\theta \cdot V} - 1 \right),$$

Оскільки $T = 24$ год, $U = 25000$, то маємо:

$$\Delta W_{T1} = \frac{20.29}{365} \cdot r_1 \cdot l^2 \cdot w_T^2 \cdot \theta \cdot V \cdot \left(2.2 \cdot \alpha \cdot \frac{N_0}{N} + \frac{l}{\theta \cdot V} - 1 \right) \cdot 10^{-6},$$

Підставивши вираз (4.12) в (4.9) отримаємо річну економію електроенергії на 1 км шляху:

$$\Delta E = \frac{365}{l} \cdot \Delta W_{T1} \cdot \left(1 - \frac{r_2}{r_1} \right) = 20.29 (r_1 - r_2) \cdot l \cdot w_T^2 \cdot \theta \cdot V \cdot \left(2.2 \cdot \alpha \cdot \frac{N_0}{N} + \frac{l}{\theta \cdot V} - 1 \right) \cdot 10^{-6},$$

Прийmemo для середніх умов: $l = 38$ км, $V = 60$ км/год, $\theta = 8$ хв; $\alpha = 1,2$ а отримані дані щодо річної економії електроенергії зведемо до таблиці 4.3.

$$\Delta \dot{Y} = 20,29 \cdot (r_1 - r_2) \cdot 38 \cdot w_A^2 \cdot 0,133 \cdot 60 \cdot \left(2,2 \cdot 1,2 \cdot \frac{N_0}{N} + \frac{38}{0,133 \cdot 60} - 1 \right) \cdot 10^{-6} =$$

$$= 6,168 \cdot (r_1 - r_2) \cdot w_A^2 \cdot \left(2,64 \cdot \frac{N_0}{N} + 3,76 \right) \cdot 10^{-3}.$$

У таблиці 4.3 наведено річну економію електроенергії ΔE , кВт год/км рік.

Таблиця 4.3. Річна економія електроенергії ΔE , кВт год/км рік

Ступінь пропуск спром. N/No	Річна економія електроенергії ΔE , кВт год/км рік при середньо-річному питомому електроспоживанні, тис. кВт год/км рік							
	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
0,1	709	2836	6381	11340	17730	25520	34740	45380
0,2	398	1594	2587	6378	9963	14350	19530	25510
0,3	295	1181	2656	4722	7378	10620	14460	18890
0,4	243	974	2191	3894	6085	8762	11930	15580
0,5	212	849	1911	3398	5309	7645	10410	13590
0,6	192	767	1725	3067	4791	6900	9391	12270

Для оцінки ефективності впровадження системи електронно-управління поїздами (ЕУП) у порівнянні з існуючою системою тягової мережі напругою 1×25 кВ використовується метод дисконтованого терміну окупності. Цей метод передбачає врахування часового фактору при дисконтуванні доходів від додаткових капіталовкладень, і таким чином, визначається період, за який

здійснюється повне відшкодування початкових витрат на реалізацію проекту.

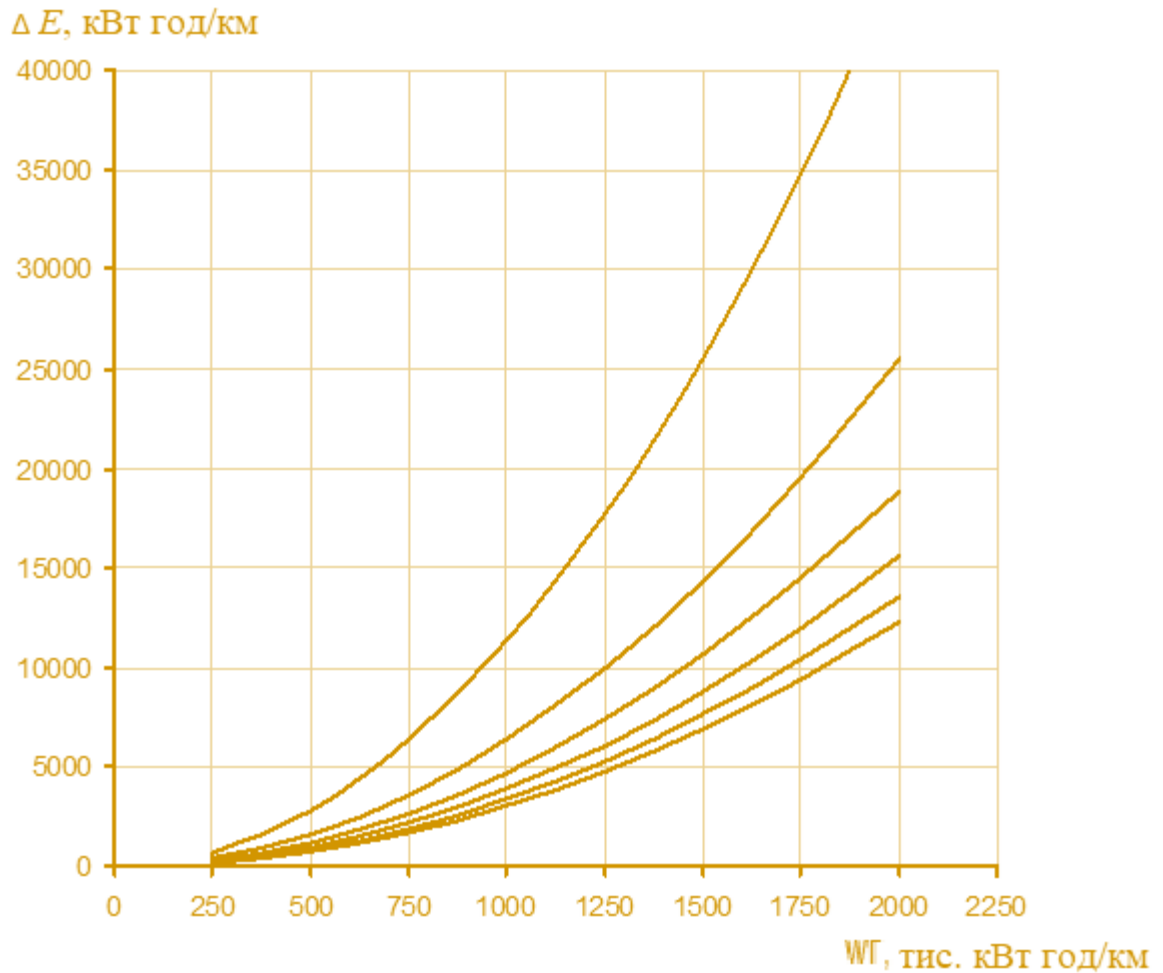


Рисунок 4.3 – Графік річної економії електроенергії, залежно від питомого електроспоживання

Суть методу дисконтованого терміну окупності полягає в послідовному відніманні дисконтованих грошових доходів від витрат на реалізацію інвестиційного проекту з метою визначення періоду, за який інвестиційні витрати повністю окупаються. Дисконтований термін окупності визначає той період, протягом якого доходи компенсують витрати і враховують дисконтну ставку. Цей підхід дозволяє здійснювати аналіз ефективності проекту, враховуючи часовий фактор. Зараз економічно виправданим терміном вважається період тривалістю 6.25 років. Розрахунок дисконтованого терміну

окупності (Т) проводиться за формулою.

$$-K + \sum_{t=1}^T \Delta Z_t \geq 0,$$

Наведений дохід у t-му році реалізації інвестиційного проекту визначається за формулою:

$$\Delta Z_t = \frac{1}{(1 + E_{HP})^t} \cdot \left[\beta_2^t \cdot \beta_1^t \cdot \frac{C_e \cdot w_{\Gamma}}{100} \cdot (P_{\Sigma 1} - P_{\Sigma 2}) - \frac{\alpha_{II}}{100} \cdot K \right],$$

де E_{HP} - коефіцієнт дисконтування, рівний прийнятної для інвестицій нормі прибутку на капітал;

β_{t1} - коефіцієнт, що враховує щорічне зростання ціни на електроенергію;

β_{t2} - коефіцієнт, що враховує щорічне зростання вантажопотоку;

C_e - ціна 1 кВт·год електроенергії на тягу поїздів;

α_{II} - амортизаційна квота для проводів, $\alpha_{II} = 2\%$.

K - додаткові капіталовкладення необхідні під час переходу від системи т. з. 1×25 кВ до системи із ЕУП.

Додаткові інвестиції відрізняються лише на один підсилювальний провід А185. Визначення капітальних витрат здійснюється за наступною формулою:

$$K = c \cdot C,$$

де c - коефіцієнт, що враховує збільшення вартості за рахунок застосування кронштейнів, ізоляторів, $c = 2$;

C - ціна 1 км підсилювального та екрануючого проводів (А-185), $C = 23000$ грн.

[22].

Визначення значення T полягає в сумуванні наростаючого підсумку наведених експлуатаційних витрат до того моменту, поки права частина виразу не стане більшою за ліву.

У розрахунках приймаємо: $\alpha = 0,1$; $\beta = 0,3$, а також використовуємо середні умови, при яких питома електроспоживання дорівнює $w_T = 1500$, рівень використання пропускної спроможності $N/N_0 = 0,3$. Результати розрахунків щодо визначення дисконтованого терміну окупності зводяться до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Розрахунок визначення дисконтованого терміну окупності

Ср. ок., рік	Поточна вартість грошового доходу, тис. грн /км	Наведена вартість за роками реалізації інвестиційного проекту тис. грн/км
0	$-K = 37$	$-37 < 0$
1	$\Delta 31 = 1.64$	$\Delta 31 - K = -35,36 < 0$
2	$\Delta 32 = 2.82$	$\Delta 31 + \Delta 32 - K = -32.54 < 0$
3	$\Delta 33 = 3.52$	$\Delta 31 + \Delta 32 + \Delta 33 - K = -29.02 < 0$
4	$\Delta 34 = 4.29$	$\Delta 31 + \Delta 32 + \Delta 33 + \Delta 34 - K = -24.73 < 0$
5	$\Delta 35 = 5.51$	$\Delta 31 + \Delta 32 + \Delta 33 + \Delta 34 + \Delta 35 - K = -19.22 < 0$
6	$\Delta 36 = 6.79$	$\Delta 31 + \Delta 32 + \Delta 33 + \Delta 34 + \Delta 35 + \Delta 36 - K = -12.43 < 0$
7	$\Delta 37 = 8.60$	$\Delta 31 + \Delta 32 + \Delta 33 + \Delta 34 + \Delta 35 + \Delta 36 + \Delta 37 - K = 3.83$

При аналізі отриманих даних можна зробити висновок, що перехід від системи 1×25 кВ до системи тягової мережі з використанням екрануючих і підсилюючих проводів призводить до збільшення економії електроенергії в тяговій мережі. Термін окупності цього переходу виявляється невеликим і в межах прийнятних норм. Дані з таблиці 4.4 свідчать про те, що дисконтний термін окупності становить 7 років, і при зростанні пропускної спроможності термін окупності зменшується.

ВИСНОВКИ

У даній науковій роботі використані методики розрахунку втрат енергії на ділянках постійного та змінного струму системи енергопостачання, у двохобмоткових та трьохобмоткових трансформаторах, а також в лініях електропередач і системі тягового електропостачання. Застосована комп'ютерна імітаційна модель для імітації ділянки і вивчення залежності втрат енергії в тяговій мережі від різних факторів.

У роботі розглянуті основні чинники, які впливають на енергоефективність міського транспорту, такі як тягово-енергетична система, рухомий склад, система обслуговування та ремонту рухомого складу, режими руху транспортних одиниць.

Виявлено, що паралельна робота різнорідних мереж призводить до зростання еквівалентного активного опору, що призводить до збільшення втрат потужності (до 10%). Для міського транспорту рекомендується використовувати безколійні колії для зменшення опору руху транспортних одиниць.

В економічній частині роботи запропоновано варіант зменшення втрат енергії при переході від системи 1 до 25 за допомогою екрануючих та підсилюючих проводів. Розраховано відсоток втрат електроенергії в тяговій мережі, економію електроенергії та термін окупності цього переходу, який становить 7 років.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про міський електричний транспорт» від 16.10.1997 №575/97 – ВР
2. Закон України «Про електроенергетику» від 16.10.1997 №575/97 - ВР; Закон України «Про енергозбереження» від 01.07.1994 №74/94 - ВР (із змінами, внесеними згідно із законом №783 - XIV (783-14) від 30.06.99, ВВР, 1999, №34, ст.274).;
3. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р;
4. Ковалко М.П., Денисюк С.П., Шидловський А.К. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України. – К.:УЕЗ, 1998. – 506 с.
5. Электробус Vitovt Max Electro стал сюрпризом для Европы [Електронний ресурс] / ABW.BY, URL: <https://www.abw.by/novosti/commercial/192528/> - 15.01.2018 р.
6. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 1. – 456 с.
7. В. Х. Далека, А. В. Шкрябко, О. С. Козлова. Методи підвищення ефективності систем електропостачання на міському електричному транспорті // Електрифікація транспорту. – 2018. № 15. С. 84–90.
8. В. Ф. Харченко, О. С. Козлова. До питання реального потенціалу підвищення енергоефективності міського транспорту // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія «Технічні науки», Том 30 (69) № 3. 2019. – С.183-190.
9. F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, E. Schmieder. Contact Lines for

- Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance, Second Edition Wiley, John & Sons, 2009. – 994 p.
10. Говоров П. П., Харченко В. Ф., Говоров В. П. Автоматизація керування режимами міських електричних мереж: монографія. ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. 229 с.
 11. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 2. – 364 с.
 12. В. М. Бушма, О. С. Гордієнко, С. П. Шацький. Моделювання витрат енергоресурсів на підприємствах міського електротранспорту // Управління проектами, системний аналіз і логістика: Науковий журнал. Вип.7. – К.: НТУ, 2010. – С. 236 – 240.
 13. В. Х. Далека, О. С. Гордієнко, Д. О. Личов. Математичні методи і моделі оптимізації виробничих програм підприємств міського електротранспорту в проектах ресурсозбереження // Коммунальное хоз-во городов: Научн.-техн. сб.: Выпуск 79. – К.: Техніка. 2007. – С. 299 – 305.
 14. Г. К. Гетьман. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта : монографія. Д.: изд. Днепр. нац. ун-та ж/д трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2008. – 444 с.
 15. Малярєнко В. А. Енергозбереження як діючий важіль реформування житлово-комунального господарства // Коммунальное хоз-во городов.- Вип. 53. К.: Техніка, 2003.- С. 8-15.
 16. Далека В. Х. Оцінка ресурсовикористання на підприємствах міського електротранспорту // Коммунальное хоз-во городов.- Вип. 46. К.: Техніка, 2002.- С. 189-196.
 17. О. М. Петренко, І. В. Доманський, Б. Г. Любарський. Методика оптимізації режимів роботи асинхронного тягового приводу рухомого

- складу // Механіка та машинобудування Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. Збірник наукових праць. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2016. – №1. – С. 59–66.
18. О. С. Гордієнко, С. Ю. Андреев. Энергозбереження на підприємствах ЖКГ // *Коммунальное хоз-во городов: Научн.-техн. сб. : Выпуск 107.* – Киев: Техника. 2013. – С. 360 – 364.
 19. Неклепаев, Б. Н. Электрична частина станцій та підстанцій. Підручник для студентів вузів.- М.: Енергія, 1976.-552с.
 20. Система тягового електрообладнання 2х25 кВ / Б.М. Бородулин, М.И. Векслер, В.Е. Марский, В.И. Павлов. - М.: Транспорт, 1989. – 247 с.
 21. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г. Оптимизация несимметричных режимов систем электрообладнання. – К.: Наукова думка, 1987. – 174 с.
 22. А. В. Наумов, А. А. Наумов. Выбор параметров и правила построения обратной тяговой рельсовой сети на электрифицированных железных дорогах со скоростным и тяжеловесным движением – М.: Интекст, 2005. – 143 с.
 23. Землянов В.Б. Энергооптимальні технології аналізу та регулювання електроспоживання на тягу поїздів: Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: 05.22.09 / Дніпропетровський держ. техн. ун-т з.д. тр-та., – Дніпропетровськ, - 2000. – 20 с.
 24. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 288 с.
 25. Рене Пелисье Энергетические системы / Пелисье Рене: пер. с франц. [предисловие и комент. В.А. Веникова]. – М. : Высш. шк., 1982. – 568 с.
 26. Мельников Н.А. Реактивная мощность в электрических сетях // -М.: Энергия, 1975. – 128 с.
 27. Правила устройства электроустановок. Разд. I. М.; — Энергоиздат, 1982.

— 88 с.

28. Лившиц В.В. Выбор оптимальных решений технико-экономических расчетов.-М.:Экономика,1991г-255с.
29. 8. Гибшман А.Е. Сравнение вариантов технических решений.- М.:Экономика,1995г-340 с.