

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

на тему Підвищення ефективності електроспоживання системи
міського електротранспорту

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1410-з

Хоревич Є.І.

(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

Степанчук
Левченко С.А.

(прізвище та ініціали) (підпис)

Запорізький національний університет

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

(повне найменування вищого навчального закладу)

Кафедра

електротехніки та енергоефективності

(по

овна 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

В.Л. Коваленко

“ 08 ”

12

2021 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Хоревичу Євгену Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема магістерської роботи Підвищення ефективності електроспоживання системи міського електротранспорту

керівник магістерської роботи

Левченко С.А., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «30» 06 2021 року № 975-с

2. Строк подання студентом магістерської роботи

01 грудня 2021 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 миськтранспортом; аналіз споживання енергоресурсів обладнанням газового господарства; схеми підключення електроприводів для керування вентиляторами

6. Консультанти розділів магістерської роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання	прийняв
Розділ 1	Левченко С.А., доцент	видав	завдання
Розділ 2	Левченко С.А., доцент	Левченко	Левченко
Розділ 3	Левченко С.А., доцент	Левченко	Левченко
Розділ 4	Левченко С.А., доцент	Левченко	Левченко
Розділ 5	Левченко С.А., доцент	Левченко	Левченко

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітка
	Вступ.	18.09.2021	
1	Аналіз поточного стану системи енергопостачання міського електротранспорту	18.09.2021	
2	Аналіз втрат в тягових мережах	10.10.2021	
3	Розробка заходів щодо підвищення енергоефективності міського електричного транспорту	10.11.2021	
4	Техніко- економічне обґрунтування розроблених заходів	20.11.2021	
5	Охорона праці	01.12.2021	
	Висновки	01.12.2021	

Студент _____
(підпис)

Є.І. Хоревич
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) _____

(підпис)

С.А. Левченко
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль здійснений

Гр С.В. Басиліс

РЕФЕРАТ

Хоревич Є.І. Підвищення ефективності електроспоживання системи міського електротранспорту.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник Левченко С.А. Запорізький національний університет. Навчально-науковий інженерний інститут ім. Потебні Ю.М. Кафедра електротехніки та енергоефективності, 2021.

Магістерська робота містить 95 сторінки, 16 рисунків, 11 таблиць, 32 літературних джерела.

Анотація. У магістерській роботі проаналізовано фактори, що впливають на енергоефективність роботи міського електротранспорту, особливо тим, що впливають на витрати енергоресурсів. Розглянуто основні напрямки підвищення енергоефективності електроспоживання системи міського електротранспорту. Проведено аналіз щодо втрат на різних ланках тягової мережі та розглянуто можливі шляхи для удосконалення системи енергоспоживання міським транспортом.

Ключові слова: енергоефективність, електротранспорт, тягова підстанція, рекуперація, енергоспоживання

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Аналіз поточного стану системи енергопостачання міського електротранспорту	8
1.1 Аналіз характеру енергоспоживання міського електричного транспорту	10
1.2 Аналіз факторів, що впливають на енергоефективність електричного транспорту	17
1.3 Аналіз технічного стану обладнання міського електротранспорту	18
2 Аналіз втрат в тягових мережах	21
2.1 Втрати енергії у трансформаторах	22
2.2 Втрати енергії у тяговій мережі	33
2.3 Аналіз параметрів тягової мережі	49
3 Розробка заходів щодо підвищення енергоефективності міського електричного транспорту	58
4 Техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів	64
5 Охорона праці	74
Висновки	82
Список використаних джерел	83
Додатки Демонстраційні матеріали	87

ВСТУП

Міський електричний транспорт, особливо у великих містах, відіграє значну роль у забезпеченні пасажирських перевезень. При цьому слід зазначити, що електротранспорт є екологічно чистим і має перспективи до свого кількісного та якісного зростання. До міського електротранспорту можна віднести тролейбуси, трамваї, метрополітен, а також міські електропоїзди та електробуси (на автономному ході).

У той же час міськтранс постійно стикається з різноманітними проблемами, як фінансової складової, так і технічної. Фінансова складова стосується у своїй переважній більшості недофінансування, пов'язаного з тим, що собівартість проїзду більша ніж вартість квитка, держава часто не покриває витрат від перевезень пасажирів пільгових категорій, а також є необхідність заміни застарілого як рухомого складу, так і системи енергопостачання і т.д.

Системи електропостачання транспортних систем за вимогами, умовами роботи, використовуваного обладнання та пристроїв, докорінно відрізняються від систем електропостачання промислових підприємств. Усе це визначило особливості роботи, проектування та методів розрахунку таких систем, які отримують електричну енергію від зовнішніх енергосистем. Електрична енергія від генераторів електростанцій передається через електричні підстанції, лінії електропередачі різної напруги та тягові підстанції. На тягових підстанціях електрична енергія перетворюється за родом струму і напруги до виду, що використовується в рухомому складі, і по тяговій мережі передається до них.

В енергосистемах у зв'язку зі зростанням протяжності електрифікованих ліній, збільшенням виробництва електроенергії, збільшуються втрати потужності ΔP , які становлять 10...15 % сумарної потужності енергосистеми. Втрати активної потужності ΔP зумовлюють втрати електроенергії ΔW у мережі. Втрати відбуваються у всіх ланках електричної системи: генераторах, трансформаторах, лініях електропередачі та ін.

Втрати енергії ΔW призводять до додаткових витрат енергоносіїв, зростає собівартість електроенергії і, як наслідок, знижується економічна ефективність енергосистеми. Дані обставини пояснюють те, наскільки важливо вміти правильно розраховувати втрати в мережі і вживати заходів до їхнього раціонального зниження.

У представлений роботі розглянуто шляхи підвищення енергоефективності енергосистеми електротранспорту. Врахування розроблених заходів дозволить зменшити витрати електроенергії і відповідно збільшити ефективність роботи міського транспорту.

Вибір напрямків роботи ґрунтувались на підставі нормативних документів [1 – 3].

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

Предмет дослідження – система енергопостачання міського електротранспорту.

1 АНАЛІЗ ПОТОЧНОГО СТАНУ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Як було зазначено вище, міський електричний транспорт вочевидь буде відігравати вирішальну роль для пасажирських перевезень у містах. Причому, на нашу думку, міста в яких вже є тролейбуси та трамваї будуть їх використовувати, а забезпечення нових міських маршрутів буде здійснюватись за рахунок використання електробусів (рис. 1.1). Тим більше, що зараз дана сфера активно розвивається через свою велику перспективність.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.3 – Сучасні електробуси різних виробників:

- а) польський Urbino 12 electric, компанія Solaris Bus & Coach S.A.;
- б) голландський VDL Citea SLF-120 Electric, компанія VDL Bus & Coach bv;
- в) німецько-турецький E-Bus S18, компанія Sileo GmbH;
- г) білоруський Vitovt Max Electro, компанія Белкоммунмаш

Згідно даних [4-6] у транспортній галузі міський електротранспорт забезпечує 12,8 % від усіх перевезень що здійснюються транспортною галуззю (рис. 1.2). Однак у крупних містах, особливо де є метрополітен доля перевезень міськелектротрансом зростає до 60 %.

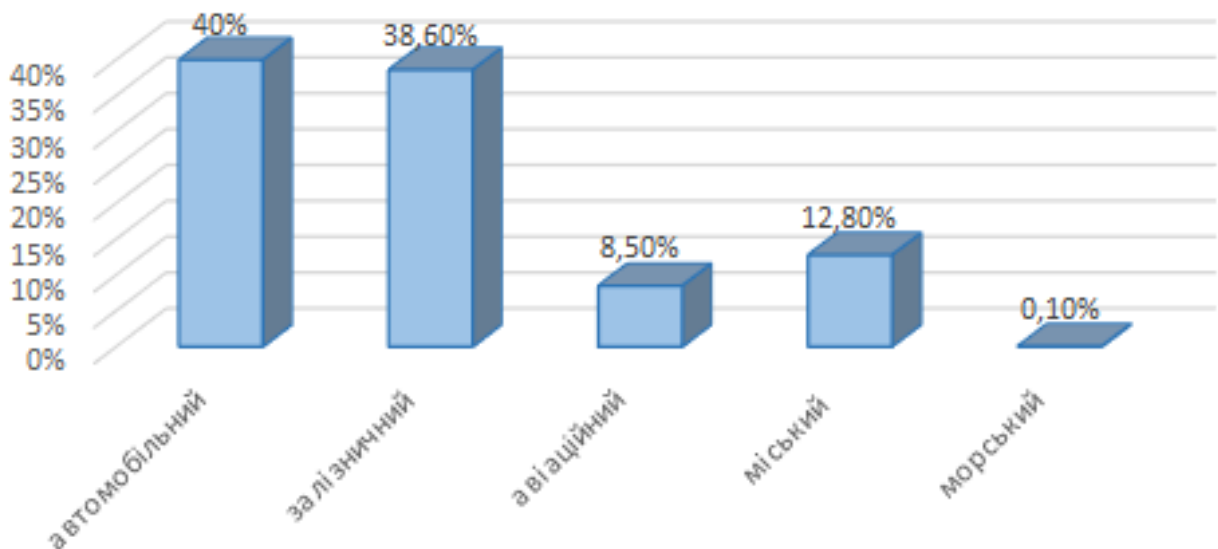


Рисунок 1.1 – Пасажиروبіг у транспортній галузі України

Окрім зазначених вище екологічних переваг електротранспорту перед іншими видами транспорту існує також надважлива енергетична складова. Так, при тому що ККД електричного двигуна може сягати 98 %, жоден двигун внутрішнього згоряння не досягає навіть 50 %. Інакше кажучи, індекс економічної енергоефективності (відношення питомих вартісних витрат паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) на одиницю роботи) електротранспорту значно вище, ніж на автотранспорті (в 1-8...2,2 разів) [7]. За даними [8] цей

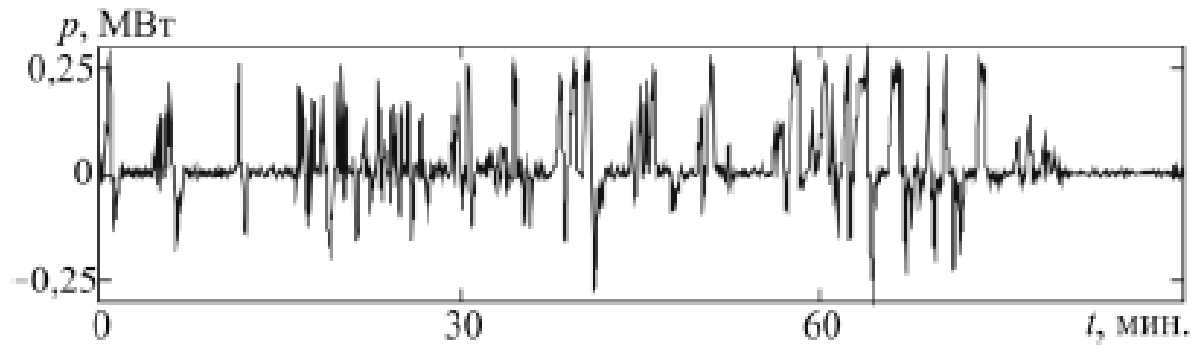
індекс для електричного транспорту складає 2,7...4,8, що є доволі високим. Також слід враховувати, що у перспективі частка електроенергії, отриманої з відновлювальних джерел, буде тільки зростати, а значить індекс економічної енергоефективності буде ще більший. Ще одним цікавим фактором, що дає певні переваги електротранспорту із зовнішнім джерелом енергії (тролейбуси, трамваї, міські електропоїзди, метро) – це можливість отримувати необхідну додаткову енергію від джерела живлення (тягової 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 їде повністю завантажений уверх по схилу. Такий режим є шкідливим для тягових двигунів, але для відносно невеликого часу (до години) може бути прийнятним. Даний фактор є суттєвим для крупних міст та/або з пагорбами, наприклад, для Дніпра.

1.1 Аналіз характеру енергоспоживання міського електричного транспорту

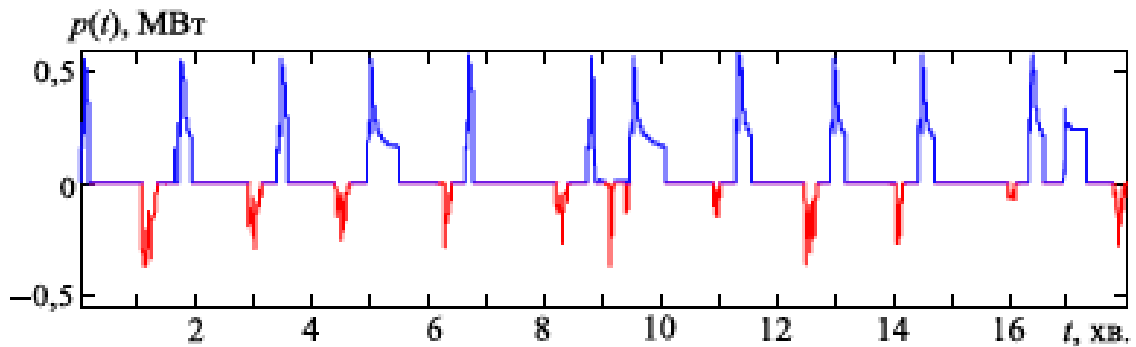
Характерною особливістю споживання енергії рухомим складом, як правило, суттєво відрізняються від споживачів стаціонарної електроенергетики. На рисунку 1.2 представлено графік споживання потужності транспортних засобів.

Електроспоживання міського електротранспорту характеризується значною нерівномірністю і циклічністю в часі. Часто, через короткі відстані між зупинками практично відсутні усталені режими електроспоживання, рекуперація при цьому переважно застосовується з метою зупинного гальмування.

Часова діаграма електроспоживання тролейбуса з рекуперацією енергії в залежності від швидкісного руху представлено на рисунку 1.3.



а)



б)

Рисунок 1.2 – Часові діаграми тягового електроживлення та рекуперації в різних видах руху транспортних засобів: трамвай ТЗД (а), електропоїзд метрополітену 81-717(714)5М (б)

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

- Максимальна і мінімальна потужність, споживана від джерела:

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

- Діапазон зміни споживаної потужності:

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

- Коефіцієнт мінімуму:

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

- Середня потужність, яка споживається від джерела за цикл:

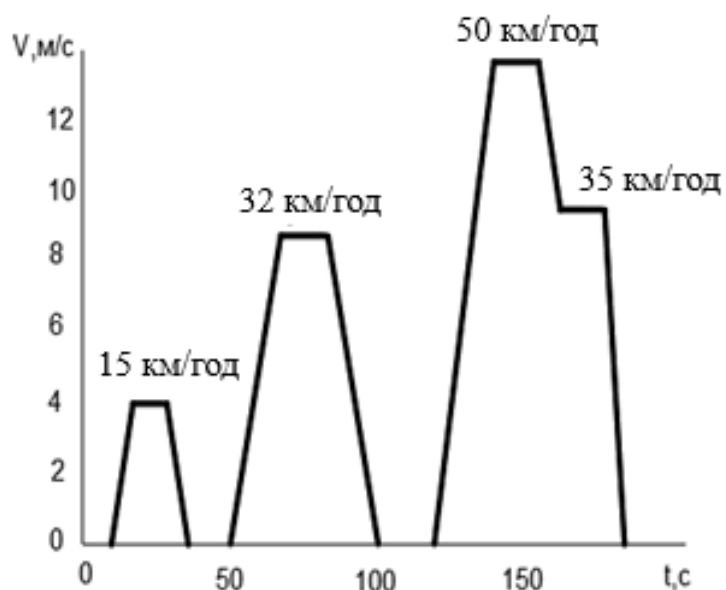
$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt,$$

- Коефіцієнт форми кривої потужності за цикл:

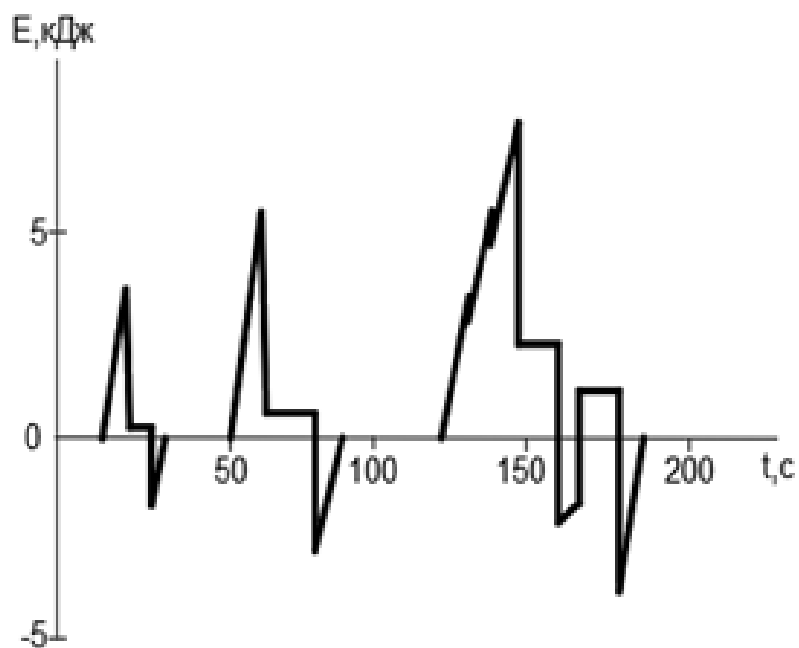
$$k_f = \frac{P_d}{P_{cp}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T p dt}.$$

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

Для гібридних енергетичних установок та електробусів характерним є наявність накопичувачів енергії, що дозволяє запасати 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.



а



б

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

а) швидкість руху; б) енергія споживання/гальмування

Якщо головною метою використання накопичувачів енергії є згладжування нерівномірності навантаження основного джерела енергії, то для оцінки енергоємності 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 справедливо співвідношення [9]:

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

Бортові енергосистеми транспортних засобів дуже компактні і не мають протяжних ліній передачі електричної енергії від джерел до споживачів. У той же час споживання енергії від джерела характеризується різко вираженою нерівномірністю. З цих причин для оцінки енергоємності бортового накопичувачів енергії зручніше користуватися граничними оцінками графіка споживання потужності. Найбільший ефект від установки накопичувачів енергії досягається тоді, коли вдається забезпечити умову

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

У цьому ідеальному випадку

$$W_{зап} = W_{від},$$

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

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

У деяких найпростіших випадках нерівномірного графіка споживання потужності (рис. 1.2) енергоємність накопичувачів енергії визначається досить простим співвідношенням:

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

У більшості практичних випадків графіки навантаження мають більш

складний вид і часто визначаються випадковими чинниками. Зокрема, тягова одиниця ЕРС з бортовим накопичувачів енергії може експлуатуватися в різних умовах (вид руху, профіль колії, змінна оперативна обстановка та ін.), в залежності від чого може змінюється величина потоків енергії і циклічність споживання енергії (рис. 1.4). На цьому рисунку представлені два різні графіка 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 енергоємність накопичувачів енергії виявиться істотно більше.

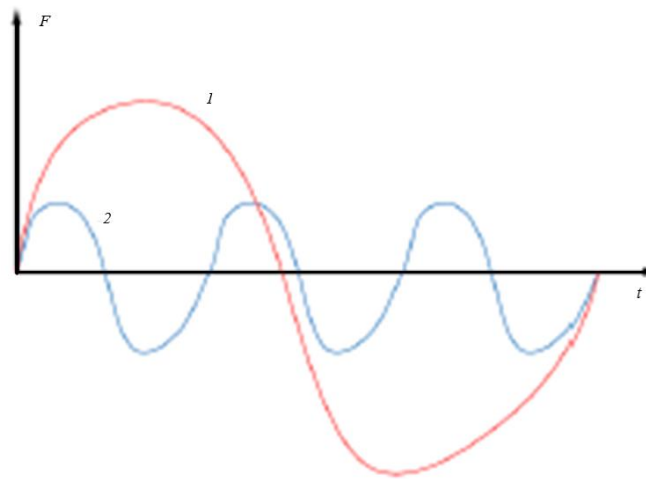


Рисунок 1.4 – Варіанти графіків зміни потужності

Оцінка енергоємності бортового накопичувачів енергії, виходячи з цільових передумов його використання на ЕРС. Перший варіант дозволяє домогтися найбільшої «приспосованості» накопичувачів енергії до конкретних завдань і умов роботи тягової одиниці, тобто домогтися 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, тому що експлуатація її в інших умовах виявиться менш ефективною. Недоліки першого варіанту можуть бути певною мірою зменшені, якщо накопичувачів енергії виконується у вигляді модульної

конструкції і дозволяє нарощувати або зменшувати енергоємність, підключаючи (відключаючи) додаткові модулі НЕ залежно від змінених конкретних умов роботи одиниці ЕРС. Інший підхід заснований на виділенні типових режимів роботи ЕРС, їх статистичне обстеження та розрахунку енергоємності бортового накопичувачів енергії, виходячи з найбільш ймовірних умов роботи даного виду ЕРС. У разі рівнинного профілю доріг потужність електротранспорту, що розвивається в сталому режимі істотно менше номінальної. На горбистому профілі потужність, що розвивається, більше, характерне чергування режимів тяги і регульовального гальмування при русі по спусках. Третій підхід заснований на визначенні енергоємності бортового 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 (контактної 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) [10]. 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.

1.2 Аналіз факторів, що впливають на енергоефективність електричного транспорту

На споживання енергоресурсів міським електротранспортом за всіма напрямками їх витрат впливає сукупність багатьох чинників, що залежать як від енергетичних характеристик тих пристроїв, що є складовими

енергоспоживання, так і від умов їхньої експлуатації (відсоток навантаження, режим роботи тощо).

В області основного напрямку підвищення енергетичної ефективності електротранспортного засобу впливають такі найбільші фактори:

- 1) оптимізація режимів руху трамваїв і тролейбусів по енерговитратах;
- 2) зниження технологічних витрат на простій і пробіг трамваїв і тролейбусів резервом, нульові пробіги;
- 3) підвищення коефіцієнта використання потужності електроприводів трамваїв і тролейбусів;
- 4) поліпшення технічного стану рухомого складу трамваїв і тролейбусів;
- 5) підвищення обсягу енергії рекуперації при одночасному поліпшенні якості та ефективному її використанні;
- 6) підвищення ККД трамваїв і тролейбусів, зменшення енергомісткості, зменшення питомого опору руху;
- 7) застосування безстикової колії, застосування лубрикації.

Таким чином, зменшення витрат електричної енергії на об'єм здійснених перевезень пасажирів є однією з головних задач господарств електричного транспорту.

Для міського електричного транспорту енергетичні ресурси мають особливе значення, оскільки забезпечують рух транспортних засобів та перевезення пасажирів. Основу енергетичних ресурсів міського електротранспорту становить електрична енергія, яка до 90...95 % споживається для пасажирських перевезень (на тягу) і 5-10 % на внутрішні технологічні потреби транспортних підприємств [10, 11].

Першочерговими завданнями у сфері споживання енергоресурсів є розробка системи показників, характеристик, норм; оцінка енергетичної ефективності (енергоємності, енергетичного еквіваленту). Пряма економія енергетичних ресурсів визначається економією за рахунок зменшення витрат

енергії на всіх ступенях виробництва, перетворення і використання, вдосконалення організації та управління виробництвом, оптимізації режимів руху, тролейбусів і вагонів, застарілого обладнання досконалішим у енергетичному відношенні. Непряма ж економія енергоресурсів досягається шляхом підвищення якості продукції, зменшення її матеріалоемності, використання нових матеріалів, сировини [14, 22].

1.3 Аналіз технічного стану обладнання міського електротранспорту

До технічних засобів енергетики електричного транспорту відносяться всі пристрої, що споживають або генерують енергію в технологічних процесах роботи електричного транспорту. Їх початковий стан в більшості своїй в даний час має високий рівень фізичного і морального зносу, завищену енергоємність. Фактичний знос трамваїв і тролейбусів по встановлених термінах служби складає 75 %, пристроїв тягового електропостачання – 75...85 %, стаціонарної електроенергетики – 50...60 % [11, 12]. За межами нормативного терміну експлуатації знаходиться більше 60 % технічних засобів енергетики. Застосування морально застарілих енергоустановок з низькими конструктивними і експлуатаційними ККД спричиняє підвищення енерговитрат на їх експлуатацію і ремонт.

Система електропостачання тягових мереж міського електротранспорту також у своїй більшості є застарілим і потребують оновлення. На даний час живлення тягових підстанцій відбувається напругою 10 кВ та 6 кВ. Термін служби більше 42 роки мають на сьогодні до 75 % тягових підстанцій міського електричного транспорту, а з терміном служби понад 50 років до 43 %. На цей час необхідна повна реконструкція більше 80 % довжини контактної мережі та тягових підстанцій міського електричного транспорту. Аналіз причин формування втрат енергоресурсів за всіма технічними засобами і технологіями міського електричного транспорту дав можливість сформулювати головні засади збільшення їхньої енергоефективності як на найближчі роки та на Основні напрямки

енергозберігаючих технічних рішень і технологій міського електричного транспорту на перспективу можна поділити на такі:

- організаційні;
- система енергопостачання;
- модернізація транспортних засобів;
- покращення технологій утримання та ремонту;
- колійне господарство;
- інші.

До організаційних заходів можна віднести оптимізацію вагових норм (рівня завантаження) на перевезення, швидкості руху, зниження частки однозначно нерентабельних напрямків, раціональне водіння електротранспорту.

Система енергопостачання передбачає модернізацію обладнання тягових підстанцій, побудова додаткових тягових підстанцій, застосування 12-пульсних схем випрямлення, ділянок з понаднормовими втратами, компенсації реактивної потужності, застосування пунктів паралельного з'єднання і постів секціонування, сучасних інверторів.

Рухомий склад: покращення конструктивних якостей, використання імпульсного регулювання, зменшення пускових втрат, широке застосування рекуперативного гальмування, виключення з експлуатації транспортних засобів, які економічно недоцільно використовувати та ремонтувати.

Покращення технологій утримання та ремонту. Це означає застосування системи утримання та ремонту «За станом». Таким чином виключається необхідність зупинки експлуатації робочих машин, їхнього простою. Але така система передбачає широке застосування діагностики, яка дозволить миттєво або у найкоротші строки відслідковувати поточний технічний стан транспортних засобів, збільшення міжремонтних пробігів, підвищення надійності рухомого складу.

Колійне (дорожнє) господарство. Для трамваїв, метрополітену, міських електропоїздів доцільно робити безстикової колії, застосовувати

лубрикатори гребенів колісних пар. Для тролейбусів та електробусів – тримати дорожнє покриття у прийнятному стані.

Технічні засоби, що модернізуються, або новітні, що проектуються та реалізуються, повинні слідувати вимогам сучасності і максимально використовувати енергоефективні режими та технології, що підвищують рівень енергозбереження.

Аналіз процесів реалізації заходів та технічних рішень з ресурсо- та енергозбереження на міському електричному транспорті свідчить, що при підтвердженому енергозберігаючому, енергозаощаджуючому ефекті практично по кожному об'єкту впровадження, в цілому по господарствах це малопомітно через зростання споживання енергоносіїв по обсягах роботи, а також через випереджаюче зростання цін на енергоносії.

Така ситуація свідчить про необхідність та доцільність впровадження енергозберігаючих режимів та технологій на усіх об'єктах міського електричного транспорту, – тягових підстанціях, трамвайних і тролейбусних депо.

2 АНАЛІЗ ВТРАТ В ТЯГОВИХ МЕРЕЖАХ

Однією з проблем системи енергопостачання є те, що на даний час немає чіткого обліку електроенергії на межі розділу балансової приналежності електричних мереж, змішуються вимірювані та розраховані приблизно величини, енергетичний баланс не відображає реального електроспоживання, потрібно значне підвищення точності вимірювання енергії. Ця тенденція зростання реактивних навантажень у тягових мережах, нові умови оплати споживання реактивної енергії зумовлює необхідність оцінки рівня втрат енергії.

Відповідно до діючих проектів на підстанціях проводиться облік активної та реактивної енергії. Цей облік здійснюється за допомогою індукційних лічильників САЗУ-І670М, СРЧУ-І673М та електронних лічильників Ф443АР. Застосування індукційних лічильників для вимірювання електроспоживання в тягових мережах, що мають несиметрію і несинусоїдність струмів і напруг призводить до істотної похибки при складанні енергетичного балансу.

Оплата втрат енергії за розрахунковими даними проводиться у разі встановлення лічильників електроенергії на межі розділу балансової належності електромережі. Втрати електроенергії дільниці від межі розділу до місця встановлення лічильників електроенергії визначаються розрахунковим шляхом.

Останнім часом особливу актуальність набула задача визначення втрат енергії у тяговій мережі. При техніко-економічних розрахунках електроспоживання при існуючій системі обліку спільно використовуються виміряні та розраховані приблизно величини. У цих розрахунках відсоток втрат у тяговій мережі приймається орієнтовно, оскільки лічильниками енергії у тяговій мережі визначити точне значення втрат енергії неможливо. Не викликає сумніву, що варіюючи величинами споживання енергії на тягу,

власні потреби підстанцій тощо. можна покрити будь-які проблеми при складанні загального енергетичного балансу.

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%. 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:

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

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

Трансформатором називається статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше індуктивно пов'язаних обмоток і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції електричної енергії в електричних мережах та установках. Силовий трансформатор є одним із найважливіших елементів кожної електричної мережі. Необхідність розподілу енергії в різних напрямках між багатьма споживачами призводить до значного збільшення кількості окремих трансформаторів порівняно з числом генераторів.

Перетворення енергії в трансформаторі відбувається за допомогою магнітного поля за допомогою сердечника та обмотки. Перетворення енергії завжди супроводжується втратами, тому потужність P_2 , що віддається трансформатором споживачеві, завжди менша за потужність P_1 , підведену до нього. Відношення цих величин $\eta = P_2/P_1$ називають коефіцієнтом корисної дії (ККД). ККД трансформаторів дуже великий і більшість їх становить 98...99 %, проте необхідність багаторазової трансформації енергії призводить до того, що загальні втрати енергії трансформаторів досягають істотних значень.

Втратами короткого замикання називаються втрати, що виникають у трансформаторі при номінальній частоті в одній з обмоток струму, що відповідає її номінальній потужності, при замкнутій коротко вторинній обмотці. Втрати короткого замикання можуть бути поділені 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 введеннями;

- втрати в стінках бака та інших металевих елементах конструкції трансформатора.

Режим роботи трансформатора при живленні однієї з його обмоток від джерела зі змінною напругою при розімкнутих інших обмотках називається режимом холостого ходу. Втрати, що виникають у трансформаторі в режимі холостого ходу при номінальній синусоїдальній напрузі на первинній обмотці та номінальній частоті, називаються втратами холостого ходу. Втрати, що виникають у трансформаторі в режимі холостого ходу при номінальній синусоїдальній напрузі на первинній обмотці та номінальній частоті, називаються втратами холостого ходу. Втрати холостого ходу трансформатора складаються з магнітних втрат, тобто втрат в активному матеріалі (сталі) магнітної системи, втрат у сталевих елементах конструкції остова трансформатора, викликаних частковим відгалуженням головного

магнітного потоку, основних втрат у первинній обмотці, викликаних струмом холостого в ізоляції. Діелектричні втрати в ізоляції можуть відігравати роль тільки в трансформаторах, що працюють при підвищеній частоті, а в силових трансформаторах, розрахованих на частоту 50 Гц, зазвичай малі і можуть не враховуватися. Основні втрати у первинній обмотці становлять 1 % втрат холостого ходу і зазвичай не враховуються. Магнітні втрати - втрати в активній сталі магнітної системи - складають основну частину втрат холостого ходу і можуть бути поділені на втрати від гістерезис та вихрових струмів. Для сучасної холоднокатаної сталі втрати від гістерезис становлять 25-35 %, а від вихрових струмів – 75...65 % повних втрат.

Втрати холостого ходу трансформатора є постійними, не залежать від струму навантаження. Вони виникають у його магнітній системі протягом усього часу, коли він працює. Втрати короткого замикання змінюються зі зміною струму навантаження і залежить від графіка навантаження трансформатора.

Зменшення втрат холостого ходу досягається головним чином шляхом широкого застосування холоднокатаної електротехнічної рулонної сталі з поліпшеними магнітними властивостями. Застосування цієї сталі, що має анізотропію магнітних властивостей і дуже чутливою до механічних пошкоджень при обробці, поєднується з істотною зміною конструкції магнітних систем. 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 гістерезис, що виникають в елементах конструкції трансформатора. Ці втрати у сумі можуть сягати 25-30 % повних втрат короткого замикання. Як найбільш ефективні засоби для зменшення додаткових втрат застосовують: 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 знайдено шляхом заміни сталевих деталей, у яких виникають втрати від гістерезиса та вихрових струмів, неметалевими або деталями з немагнітних матеріалів.

Розрахунок втрат у двохобмоточному трансформаторі.

Для визначення втрат у двохобмоточному трансформаторі необхідні 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 $W_{Pф}$ та реактивної $W_{Qф}$ 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:

$$S_{ф} = \sqrt{(P_{ф}^2 + Q_{ф}^2)}; \quad P_{ф} = W_{Pф} / T_{р}; \quad Q_{ф} = W_{Qф} / T_{р};$$

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

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:

$$\Delta WQ = \Delta Q_{xx} \cdot T_H + \Delta Q_{kз} \cdot Kз^2 \cdot T_p;$$

де:

$$\Delta Q_{xx} = S_{ном} \cdot I_{xx} / 100; \quad \Delta Q_{kз} = S_{ном} \cdot U_{kз} / 100;$$

Втрати у трансформаторах, які живлять тягове навантаження:

а) втрати активної енергії кВт·год:

$$\Delta WP = \Delta P_{xx} \cdot T_H + \Delta P_{kз} \cdot Kз^2 \cdot K_{еф}^2 \cdot T_p;$$

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

б) втрати реактивної електроенергії:

$$\Delta WQ = \Delta Q_{xx} \cdot T_H + \Delta Q_{kз} \cdot Kз^2 \cdot K_{еф}^2 \cdot T_p$$

Технічні дані трансформаторів наведені у таблицях 2.1, 2.2.

Таблиця 2.1 – Технічні дані двообмотувальних однофазних трансформаторів

Тип трансформатора	Номинальна потужність S_n , кВА	Номинальна напруга U_n , кВ		Втрати, Вт		Струм I_{xx} , %	Напруга к.з., $U_{kз}$, %
		ВН	НН	ΔP_x	$\Delta P_{kз}$		
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 двообмотувальних трьохфазних трансформаторів

Тип трансформатора	Номінальна а 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

Розрахунок втрат у трьохобмотувальному трансформаторі.

Для розрахунку втрат електроенергії необхідні 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, %:

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

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

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

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

- реактивна потужність, що споживається обмотками:

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

- 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_p ;

При розрахунку послідовно визначаються:

а) фактична потужність кожної обмотки трансформатора за розрахунковий період:

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

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

$$S_{фпн} = \sqrt{(P_{фпн}^2 + Q_{фпн}^2)}$$

де:

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

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

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

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

Тип трансформатора	Потужність, МВА	напруга обмоток, кВ			напруга 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

Тип трансформатора	Номинальна потужність S _н , кВА	Втрати ,Вт	
		ΔР _{хх}	ΔР _{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 тяговій мережі

Тягова мережа складається з чотирьох складових: контактної та рейкової мереж, що живлять та відсмоктують проводів. 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 розвиток 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 боку втрат тягова мережа змінного струму краща, оскільки потужність передається підвищеними значеннями 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 з 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 погляду втрат двостороннє живлення краще, але з погляду надійності гірше, тому що при виникненні пошкодження контактної мережі з ладу вийде вся ділянка, а на змінному струмі можуть виникати перетікання 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 $U_{\min} =$

2.7кВ, а на змінному $U_{\text{мін}} = 21\text{кВ}$. Зниження втрат енергії в контактній мережі дає економію споживаної електроенергії.

Живлення двоколієних 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 одноколієній 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.

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

$$\Delta W_{\text{тс}} = \Delta W_{\text{тс}1} + \Delta W_{\text{тс}2};$$

де: $\Delta W_{\text{тс}1}$ - 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).

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 одноколіїної 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 одноколіїної 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 багатоколіїних ділянках визначаються як сума втрат на одноколіїних ділянках. Приблизно втрати електроенергії на міжпідстанційній зоні визначаються за втратами суміжних підстанцій, з урахуванням відношення довжин та кількості шляхів ділянки, що розглядається, а також суміжних із нею міжпідстанційних зон, які живляться від цієї підстанції.

У розглянутих вище формулах прийнято такі позначення:

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

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

N - середнє число пар поїздів дільниці;

l - довжина міжпідстанційної зони, км;

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

$$W_{рм} = W_{р1от} + W_{р2от} - (W_{р1г} + W_{р2г});$$

де: $W_{р1от}$, $W_{р2от}$ - активна енергія, відпущена в тягову мережу першою та другою підстанцією відповідно;

$W_{р1г}$, $W_{р2г}$ - 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:

$$\Delta W_{тс2} = (W_{р1г}^2 + W_{q1г}^2) / (U_{ср1}^2 \cdot T_{н}) \cdot R_e + (W_{р2г}^2 + W_{q2г}^2) / (U_{ср2}^2 \cdot T_{н}) \cdot R_e,$$

де:

$W_{p1г}$, $W_{p2г}$ - активна енергія, генерована в енергосистему через фідера першої та другої підстанції відповідно;

$W_{q1г}$, $W_{q2г}$ - 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

Тип рейок	Струм у рейці I_p , А			
	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

Марки проводів тягової мережі	Одноколійна ділянка r1, Ом/км	Двоколійна ділянка	
		Один шлях, r1, Ом/км	Паралельне з'єднання r2, Ом/км
1	2	3	4
Постійний струм			
M120+2MΦ100	0,07	0,067	0,034
M120+2MΦ100+A185	0,054	0,049	0,026
M120+2MΦ100+2A185	0,044	0,04	0,021

Продовження таблиці 2.6

M120+2MΦ100+3A185	0,038	0,034	0,018
ПБСМ95+2MΦ100	0,094	0,089	0,046
ПБСМ95+2MΦ100+A185	0,064	0,06	0,032
ПБСМ95+2MΦ100+2A185	0,049	0,045	0,024
M120+2MΦ150	0,062	0,058	0,031
M120+2MΦ150+A185	0,048	0,045	0,024
M120+2MΦ150+2A185	0,04	0,036	0,02
M120+2MΦ150+3A185	0,035	0,031	0,017
Змінний струм			
ПБСМ70+MΦ100	0,209	0,195	0,111
ПБСМ95+MΦ100	0,194	0,182	0,104
M120+MΦ100	0,124	0,112	0,07
ПБСМ70+MΦ100+A185	0,123	0,112	0,068
ПБСМ95+MΦ100+A185	0,119	0,108	0,066

Складнощі визначення втрат у тяговій мережі

Система електропостачання змінного струму 27,5 кВ з екрануючим та підсилюючим проводами (ЕУП) вже майже 10 років успішно застосовується в Україні. Серед її переваг є низький опір тягової мережі, можливість рознести підстанції на відстань до 100 км, підвищену безпеку та знижений електромагнітний вплив на суміжні споруди. Цілком можливо, що система знайде своє широке застосування на більшості залізниць.

Останнім часом особливої актуальності набула тема визначення втрат енергії у тяговій мережі. При техніко-економічних розрахунках електроспоживання при існуючій системі обліку спільно використовуються виміряні та розраховані приблизно величини. У цих розрахунках відсоток втрат у тяговій мережі приймається орієнтовно, оскільки лічильниками енергії у тяговій мережі визначити точне значення втрат енергії неможливо. Не викликає сумніву, що варіюючі величинами споживання енергії на тягу,

власні потреби підстанцій тощо. можна покрити будь-які проблеми при складанні загального енергетичного балансу.

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

Невизначеність у цьому питанні дозволяє списувати на так звані «умовні» втрати, організаційно-економічні недоліки різних служб та підрозділів залізниць. У цих умовах на низці доріг втрати в тяговій мережі змінного струму оцінюють величиною 10-15%, тоді як дійсні 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 поява додаткових індуктивних зв'язків між ними та контактною мережею та рейкою. А беручи до уваги, що контактні дроти мають у деяких місцях знос вищий за нормативний, то й зовсім виходить, що опорами з довідників користуватися не можна, через можливі великі похибки. Рейкова мережа теж змінена, зважаючи на наявність заземлювачів і шляхи 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 блукаючих струмів, які також впливають втрати в системі.

Складності визначення втрат енергії у тяговій мережі.

Останнім часом через обмеженість енергоносіїв все більш гостро виникають проблеми раціонального та економічного витрачання енергії, у тому числі й електричної. Основним споживачем електричної енергії на залізничному транспорті є електричний потяг. За своєю природою тягове навантаження відрізняється від нетягової тим, що одночасно переміщається у просторі та змінюється у часі. Особливу актуальність набула задача визначення та прогнозування втрат у тяговій мережі.

Можливість прогнозування втрат, а разом з ними та енергії, необхідна для розвитку оптового ринку електроенергії шляхом виходу на нього тягових споживачів. При техніко-економічних розрахунках електроспоживання використовуються виміряні та розраховані приблизно величини. У цих розрахунках відсоток втрат у тяговій мережі приймається (!) орієнтовно, тому що за існуючої системи обліку точне значення втрат енергії визначити неможливо. Це дає можливість варіювати величинами споживання електроенергії на тягу, цим покриваючи проблеми під час упорядкування загального енергетичного балансу. У результаті так звані «умовні втрати» списуються організаційно-економічні недоліки та недоробки різних служб і структурних підрозділів залізниць.

У цих умовах на ряді доріг втрати в тяговій мережі змінного струму оцінюють величиною 10-15%, тоді як дійсні втрати становлять 3-5%.

Для вирішення цих проблем пропонується при визначенні та прогнозуванні втрат використовувати спеціальну програму, яка дозволяє проводити моделювання тягового навантаження.

Слід зазначити, що застосування стандартних моделей, таких як Electronics Workbench, не дозволяє отримати необхідний результат, оскільки не реалізується процес переміщення навантаження, а при моделюванні руху поїзда ділянкою доводиться моделювати кожен миттєву схему окремо. Це дуже незручно, доводиться зменшувати кількість миттєвих схем, у своїй збільшується похибка 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 (рис. 2.1):

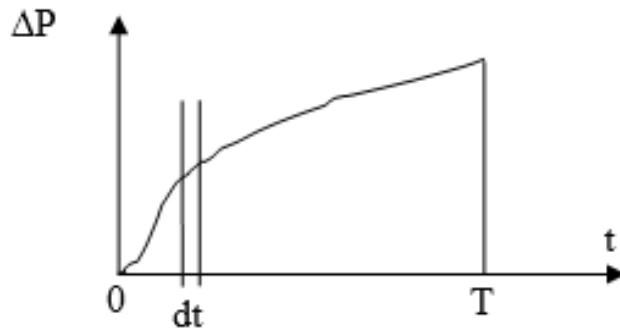


Рисунок 2.1 – Зміна миттєвих втрат потужності у часі

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

У програмі є вбудований довідник параметрів елементів тягової мережі. Якщо вибрано потрібну марку елемента з запропонованого списку, автоматично змінюються параметри цього елемента.

Процес складання матриць повністю автоматизований. Для побудови матриць опорів Z використані формули Ф. Поллячека. Так, наприклад, еквівалентний опір чотирьох рейок двоколійної ділянки розраховується за формулою:

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

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.

Для тягових мереж змінного струму враховано опір взаємодукції між елементами тягової мережі (рис. 2.2). При цьому формування матриць Z_v , що

враховують взаємоіндукцію, ґрунтується на тій же методиці Ф. Поллячека. Так для двоколіїної ділянки змінного струму повний опір між контактними підвісками 2-х шляхів визначається згідно з формулою:

$$\underline{Z}_{T\phi 1 T\phi 2} = \underline{Z}_{T1 T2} - \frac{\underline{Z}_{T1 P} \cdot \underline{Z}_{T2 P}}{\underline{Z}_{P3}}$$

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

$\underline{Z}_{T1 P}$, $\underline{Z}_{T2 P}$ – опір контурів контактна підвіска – рейка для кожного шляху;

$\underline{Z}_{T1 T2}$ - Опір взаємоіндукції між контурами контактна підвіска-рейка 1-го шляху та контактна підвіска - рейка 2-го шляху;

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

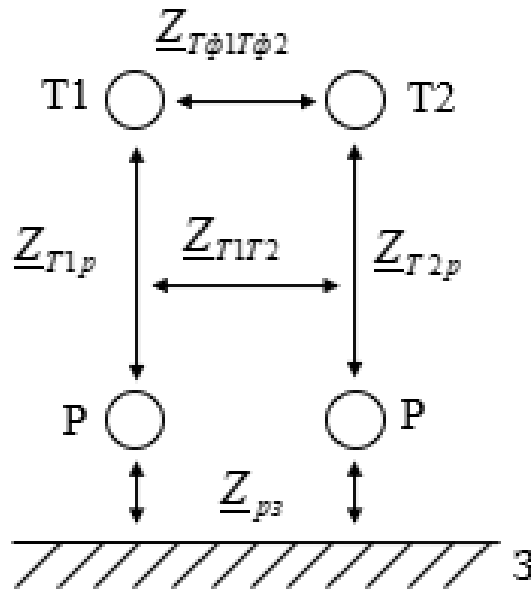


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема до визначення повного опору:

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

Одним із розрахункових режимів є покроковий. Як крок прийнято за замовчуванням 1 хвилина. Крок розрахунку може набувати значень 0.1, 0.5, 1, 2, ... 10. Під кроком розуміється зміщення поїздів, що знаходяться на розрахунковій зоні, на відстань, що відповідає значенню кроку розрахунку та швидкості поїзда. При необхідності в цей момент часу можуть бути змінені такі параметри поїзда як струм і швидкість руху.

Крім покрокового передбачено режим пакетного пропуску заданої кількості поїздів із заданим інтервалом часу. Цей режим можна використовувати для визначення тенденції зміни витрати енергії та втрат у тяговій мережі у часі.

Використовуючи режим побудови графіка руху поїздів (ГДП), можна вести розрахунок за реально існуючим ГДП. Це дає можливість, маючи офіційний документ, визначити втрати в тяговій мережі, кількість електроенергії, спожиту за цей час і мінімальну напругу на струмоприймачі електровоза. Використовуючи вказаний режим, можна дивитися як зміна ГДП вплине на витрати енергії і втрати.

Запланована похибка при розрахунках становить близько 3%. На 2-х путніх ділянках змінного струму при відключеному одному зі шляхів, можна дізнатися, яка буде максимальна наведена напруга на іншому шляху. Використовуючи цю можливість, надалі можна буде оцінити рівень впливу, що заважає, від тягового навантаження на лінії зв'язку, прокладені вздовж електрифікованої ділянки.

На особливу увагу заслуговує ймовірнісний режим. Його рекомендується використовувати, коли графік руху поїздів не відомий, але відомі ваги поїздів та заплановані розміри руху. У такому разі за вказаний період поїзда відбувається випадковий процес запуску поїзда з урахуванням загальної кількості поїздів та кількості поїздів кожного типу. Цей режим буде корисний для оцінки значення витрати енергії та втрат у тяговій мережі. Для більш точної оцінки необхідно буде імітацію робити неодноразово, а потім, порівнюючи результати розрахунків, робити необхідні висновки.

На даний момент серед рейкового міського транспорту нас цікавить міський електропоїзд, метрополітен та трамвай. Для кожного такого 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 даному етапі швидкість і споживаний струм ЕРС за час його ходу по розрахунковій зоні постійні, але насправді це не так і буде враховано в подальшому розвитку. Крім цього необхідно додати можливість розрахунку нових схем живлення, таких як ЕУП, та 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 приклади:

Приклад 1

Є фідерна зона двоколіїної ділянки постійного струму завдовжки 24 км з тяговою мережею М-120 + 2МФ-100 + Р-75. Необхідно здійснити пакетний пропуск 5-ти поїздів по заданій ділянці та побудувати графіки втрат потужності при інтервалі в пакеті рухомого складу 7, 10 та 13 хв (таблиця 2.7).

Таблиця 2.7 – Результати розрахунку 1

№ п/п	Інтервал, хв	Споживана енергія, тис. кВт*год	Втрати енергії, тис. кВт*год	Втрати енергії, %
1.	7	12,69	1,61	12,71
2.	10	12,69	1,27	10,02
3.	13	12,69	1,09	8,57

На графіку представлено графіки втрат енергії під час проходження з інтервалами 7, 10 і 13 хвилин відповідно. Як видно зі збільшенням інтервалу попутного прямування майже вдвічі втрати енергії зменшилися в 1,5 рази. Докладніше це можна побачити на рисунку 2.3.

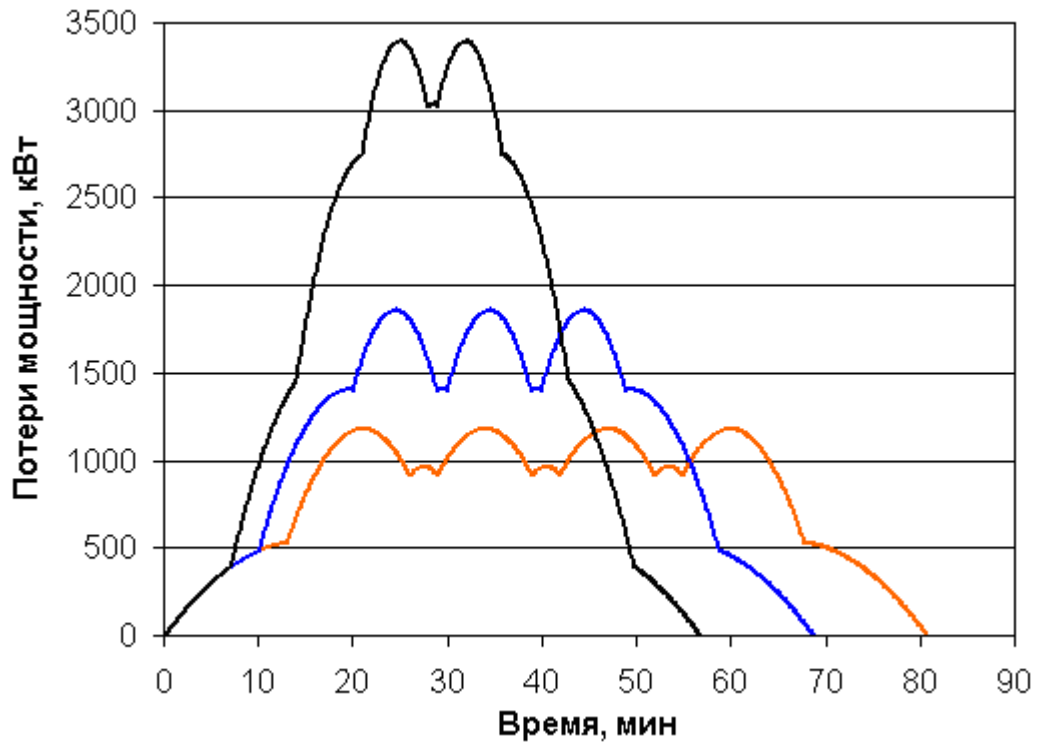


Рисунок 2.3 – Втрати потужності при пакетному пропуску ЕРС

Приклад 2

Є фідерна зона двоколіїної ділянки змінного струму завдовжки 50 км з тяговою мережею ПБСМ-95 + МФ-100 + Р-65.

Розглянемо випадок, при якому проводиться пакетний пропуск 12-ті поїздів по двоколіїній ділянці (по 6 на кожному шляху), а потім 6-ти поїздів по одному з колій, коли другий шлях вимкнено (табл. 2.8).3

Таблиця 2.8 – Результати розрахунку 2

№ п/п	Кількість поїздів	Споживана активна енергія, тис. кВт·год	Втрати активної енергії, тис. кВт·год	Втрати активної енергії %
1	12	80,95	3,51	4,33
2	6	40,48	1,56	3,86

У разі пропуску по кожному з колій двоколійної ділянки 6-ти ЕРС спожита енергія вдвічі більша, ніж при пропуску 6-ти поїздів тільки одним шляхом, втрати активної енергії вищі більш ніж удвічі через наявність індуктивного зв'язку між підвісками кожного зі шляхів (рис. 2.4).

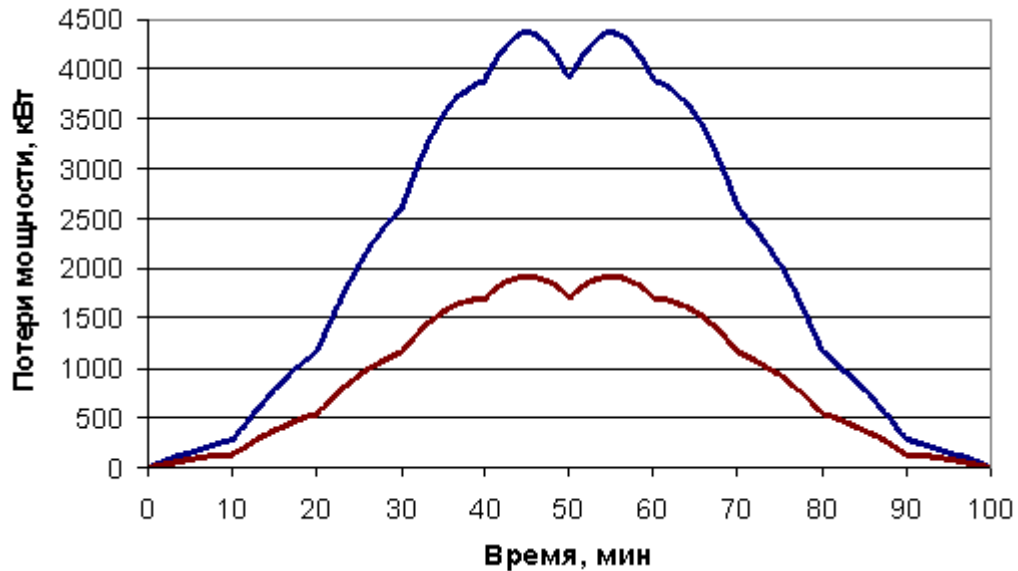


Рисунок 2.4 – Втрати потужності при роботі одного та двох шляхів

Приклад 3. Є фідерна зона ділянки змінного струму завдовжки 50 км з тяговою мережею ПБСМ1-95 + МФ-100 + Р-65.

За заданим графіком руху поїздів визначити залежність активних втрат у тяговій мережі від часу за період 3 години.

За допомогою ймовірнісного режиму імітації визначити ту саму залежність (таблиця 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):

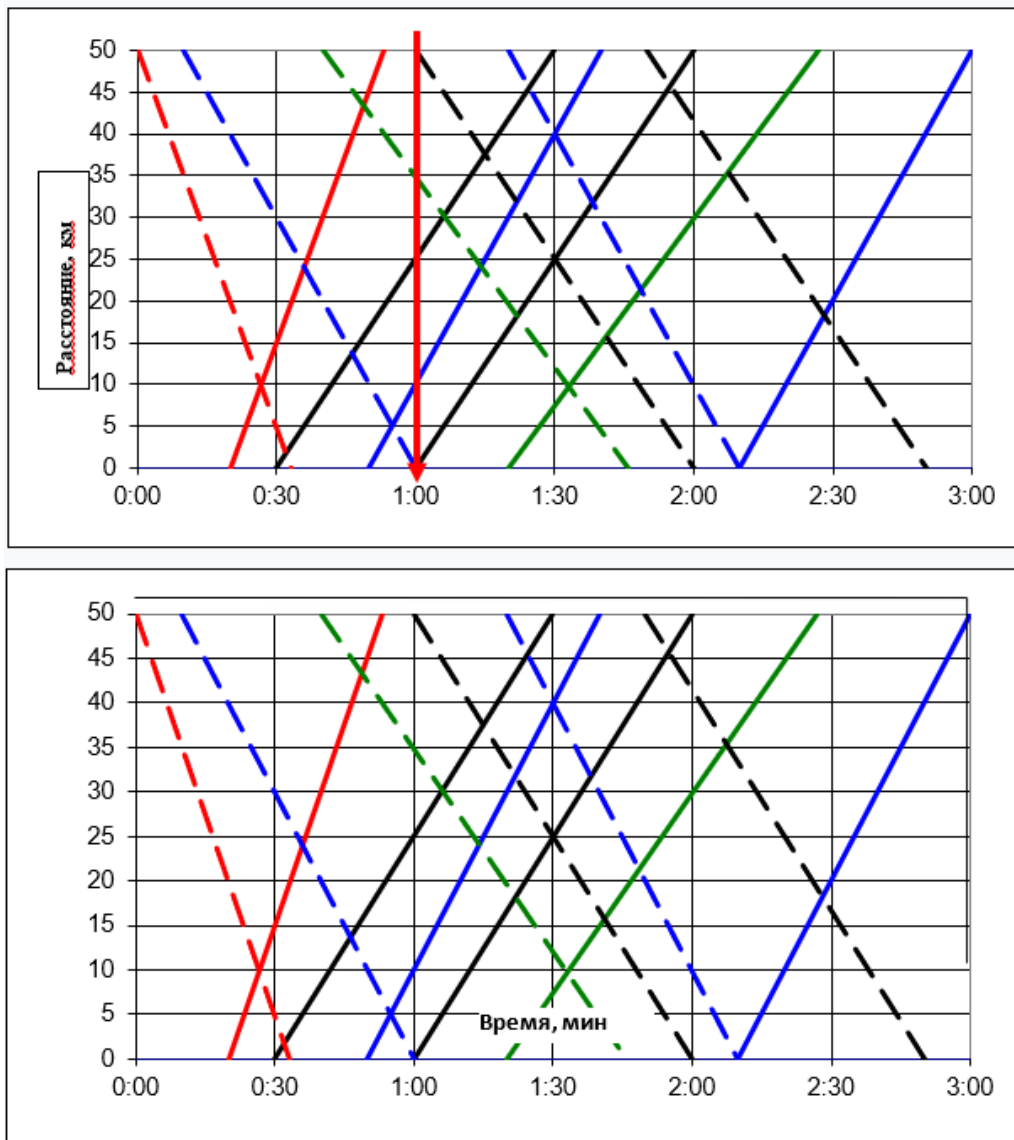


Рисунок 2.5 – Графік руху поїздів та втрати потужності

Як очевидно з останнього рисунку розрахунок по імовірнісному режиму за певних умов цілком може замінити розрахунок за виконаним графіком руху поїздів, оскільки площі, обмежені кривими, (втрати енергії) приблизно рівні. Звідси випливає, що методику можна використовуватиме прогнозування втрат енергії при відомих розмірах руху.

2.3 Аналіз параметрів тягової мережі

Проведемо аналіз залежності втрат енергії від витрати під час проходження одиниці ЕРС. Приймемо одноколіїну ділянку постійного струму. Підвіска М-95 + 2МФ150 + А-120

ЕРС, що їде зі швидкістю 60 км/год, споживає струм 1000 А. Тоді, змінюючи довжину зони від 1 км до 30 км, визначимо коефіцієнт втрат, витрата енергії, витрата 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

Довжина ділянки а	Витрати енергії, тис. кВт · год	Коефіцієнт втрат, %	Витрати	ККД, %
			енергії на рух поїзда, тис. кВт · год	
1	2	3	4	5
1	0.055	0.27	0.054852	99.73
2	0.11	0.54	0.109406	99.46
3	0.165	0.81	0.163664	99.19
4	0.22	1.09	0.217602	98.91
5	0.275	1.36	0.27126	98.64

6	0.33	1.63	0.324621	98.37
7	0.385	1.9	0.377685	98.1
8	0.44	2.17	0.430452	97.83
9	0.495	2.45	0.482873	97.55
10	0.55	2.71	0.535095	97.29
11	0.605	2.98	0.586971	97.02
12	0.66	3.26	0.638484	96.74
13	0.715	3.53	0.689761	96.47
14	0.77	3.8	0.74074	96.2
15	0.825	4.07	0.791423	95.93
16	0.88	4.35	0.84172	95.65
17	0.935	4.62	0.891803	95.38
18	0.99	4.89	0.941589	95.11
19	1.045	5.17	0.990974	94.83
20	1.1	5.43	1.04027	94.57

Продовження 2.10

1	2	3	4	5
21	1.155	5.71	1.08905	94.29
22	1.21	5.98	1.137642	94.02
23	1.265	6.25	1.185938	93.75
24	1.32	6.52	1.233936	93.48
25	1.375	6.79	1.281638	93.21
26	1.43	7.07	1.328899	92.93
27	1.485	7.34	1.376001	92.66
28	1.54	7.61	1.422806	92.39
29	1.595	7.89	1.469155	92.11
30	1.65	8.16	1.51536	91.84

З даних таблиці 2.10 побудуємо графік залежності ККД від довжини ділянки електропостачання (рис. 2.6).

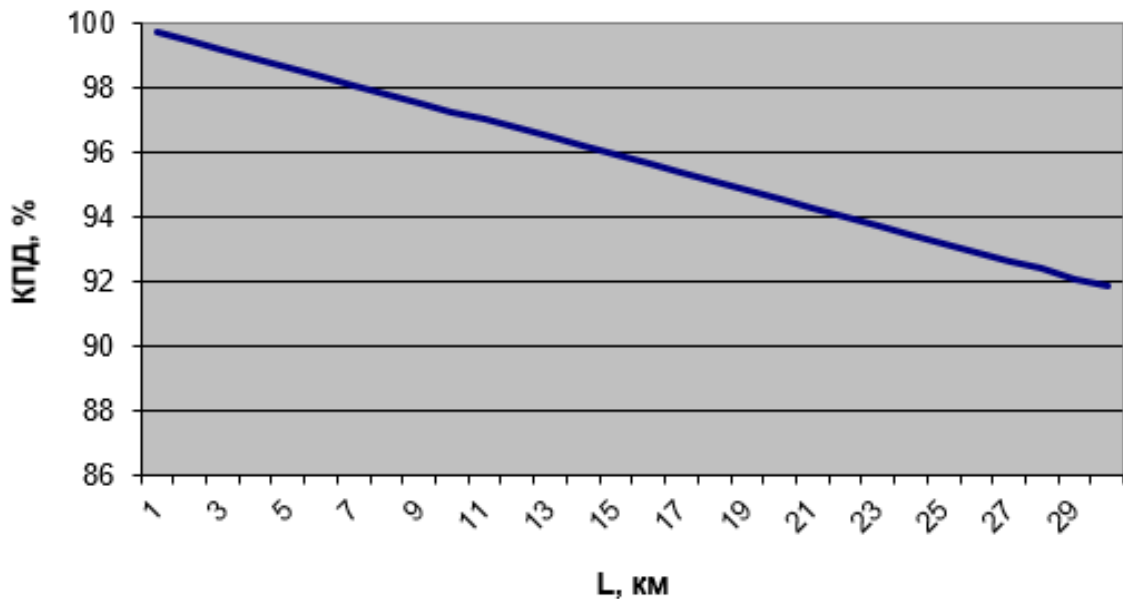


Рисунок 2.6 – Залежність ККД від довжини ділянки електропостачання

Як видно з графіка, коефіцієнт корисної дії постійно зменшується і визначити з його допомогою оптимальну довжину зони не вийде. Тому, введемо поняття коефіцієнта неефективності, K_H

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

де $\Delta W_{\text{ОБЩ}}$ – 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	0.049091
2	0.11	0.54	0.049091

3	0.165	0.81	0.049091
4	0.22	1.09	0.049545
5	0.275	1.36	0.049455
6	0.33	1.63	0.049394
7	0.385	1.9	0.049351
8	0.44	2.17	0.049318
9	0.495	2.45	0.049495
10	0.55	2.71	0.049273
11	0.605	2.98	0.049256
12	0.66	3.26	0.049394
13	0.715	3.53	0.049371
14	0.77	3.8	0.049351
15	0.825	4.07	0.049333
16	0.88	4.35	0.049432
17	0.935	4.62	0.049412
18	0.99	4.89	0.049394
19	1.045	5.17	0.049474
20	1.1	5.43	0.049364
21	1.155	5.71	0.049437

Продовження таблиці 2.11

1	2	3	4
22	1.21	5.98	0.049421
23	1.265	6.25	0.049407
24	1.32	6.52	0.049394
25	1.375	6.79	0.049382
26	1.43	7.07	0.049441
27	1.485	7.34	0.049428
28	1.54	7.61	0.049416
29	1.595	7.89	0.049467
30	1.65	8.16	0.049455
31	1.705	8.43	0.049443
32	1.76	8.7	0.049432
33	1.815	8.97	0.049421
34	1.87	9.24	0.049412
35	1.925	9.52	0.049455
36	1.98	9.79	0.049444
37	2.035	10.06	0.049435
38	2.09	10.33	0.049426
39	2.145	10.6	0.049417
40	2.2	10.88	0.049455
50	2.75	13.6	0.049455

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

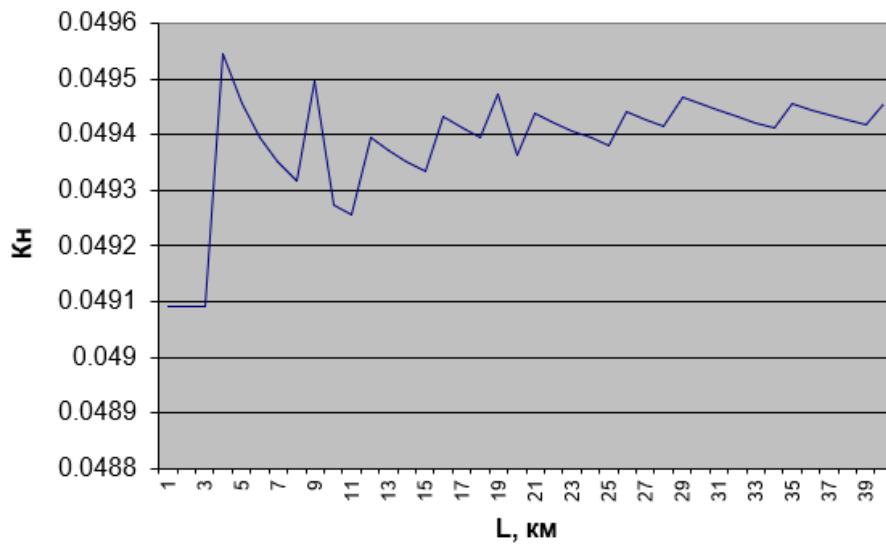


Рисунок 2.7 – Залежність коефіцієнта неефективності від довжини зони

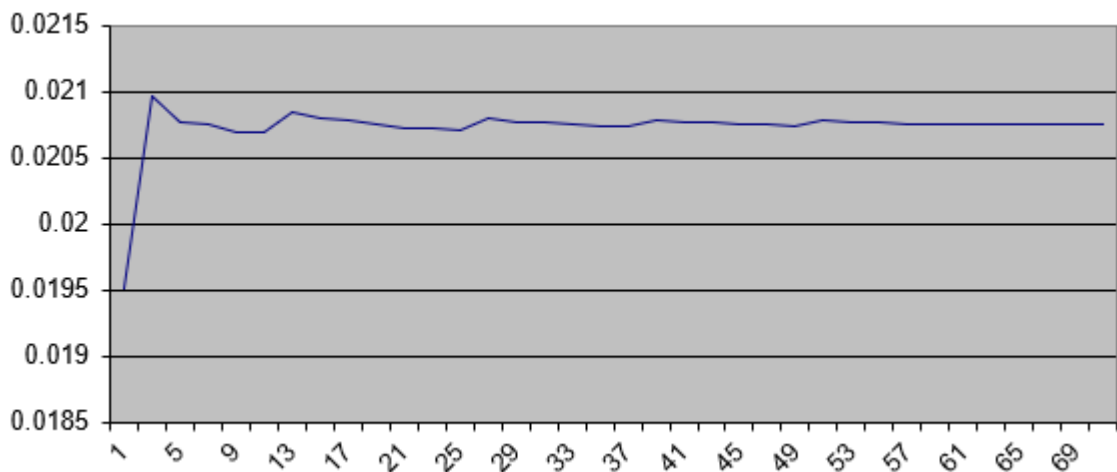


Рисунок 2.8 – Залежність коефіцієнта неефективності від довжини зони

До речі, як можна побачити з порівняння графіків (рис. 2.7 та рис. 2.8) впливає, що використання енергії на змінному струмі йде більш ефективно, ніж на постійному.

Досліджуючи залежність втрат енергії від опору, приходимо до висновку, що, збільшуючи перетин підвіски – знижуються втрати, і ця залежність лінійна. Особливу увагу хотілося б приділити опору рейкового ланцюга. Власний опір рейок впливає втрати не зовсім так само як і в контактній мережі, тому, що існує ще й перехідний опір рейок-земля. При

збільшенні власного опору рейки (стиків) спостерігається збільшення стікання струму в землю (рис. 2.9).

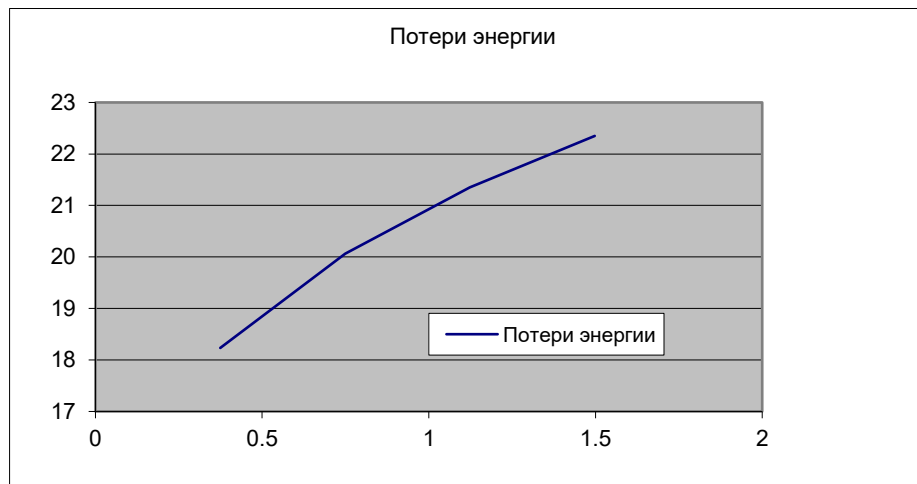
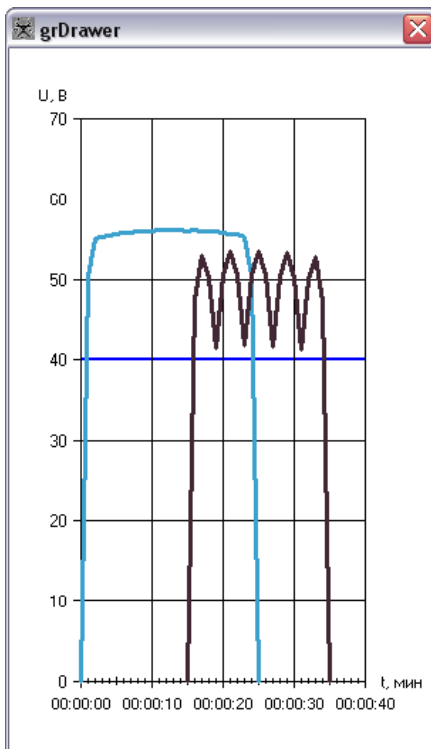
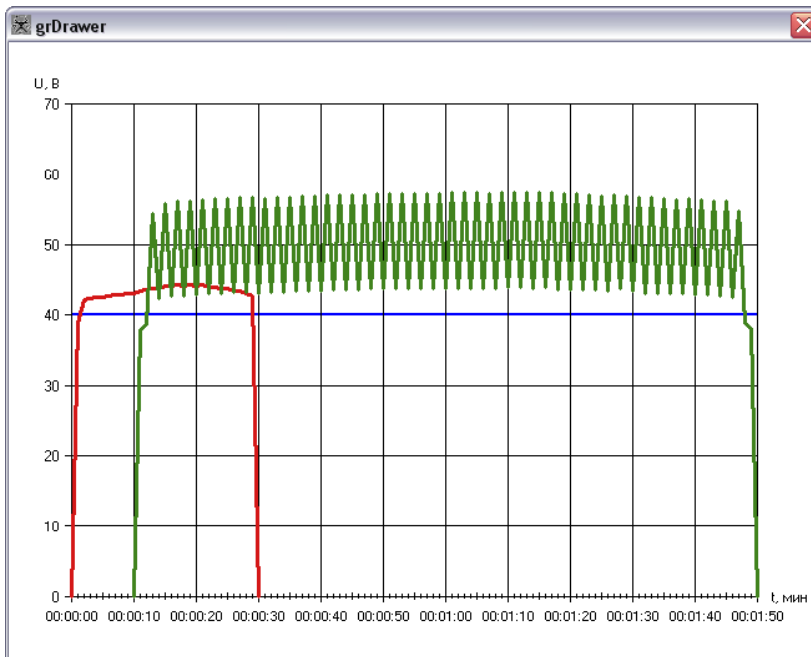


Рисунок 2.9 – Графік залежності втрат енергії від опору стиків

Також при зменшенні опору стиків зменшуються потенціали рейок щодо землі. Дуже важливу роль відіграє перехідний опір рейок-земля. При збільшенні цього опору більшість струму починає протікати по рейках, що викликає додаткові втрати в рейці, а також збільшення потенціалу рейки щодо землі (рис. 2.10).



а

б

Рисунок 2.10 – Небезпечні потенціали рейок-земля

Втрати енергії збільшуються нелінійно. На рисунку 2.11 представлена залежність зміни втрат енергії(%) від перехідного опору рейок-земля (Ом/км).

Залежність втрат енергії від перехідного опору показано на рисунку 2.12.

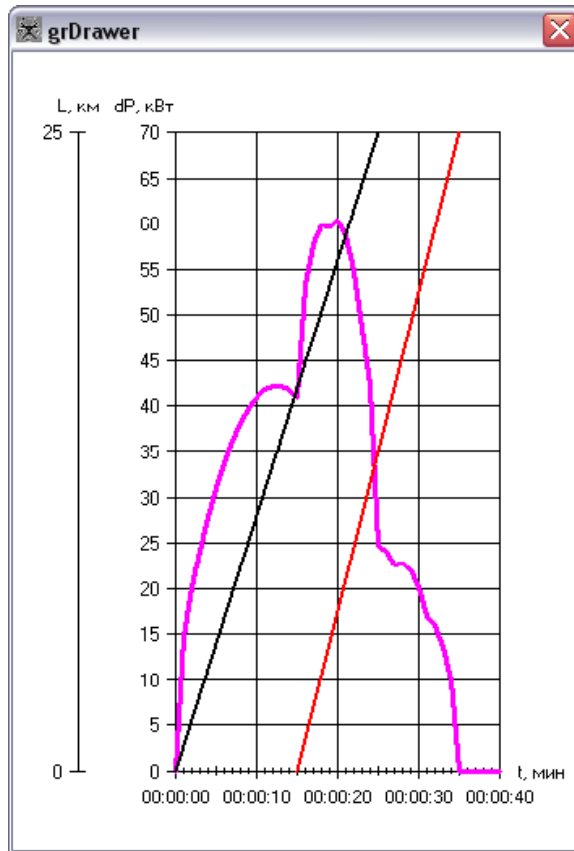


Рисунок 2.11 – Втрати потужності під час руху ЕРС

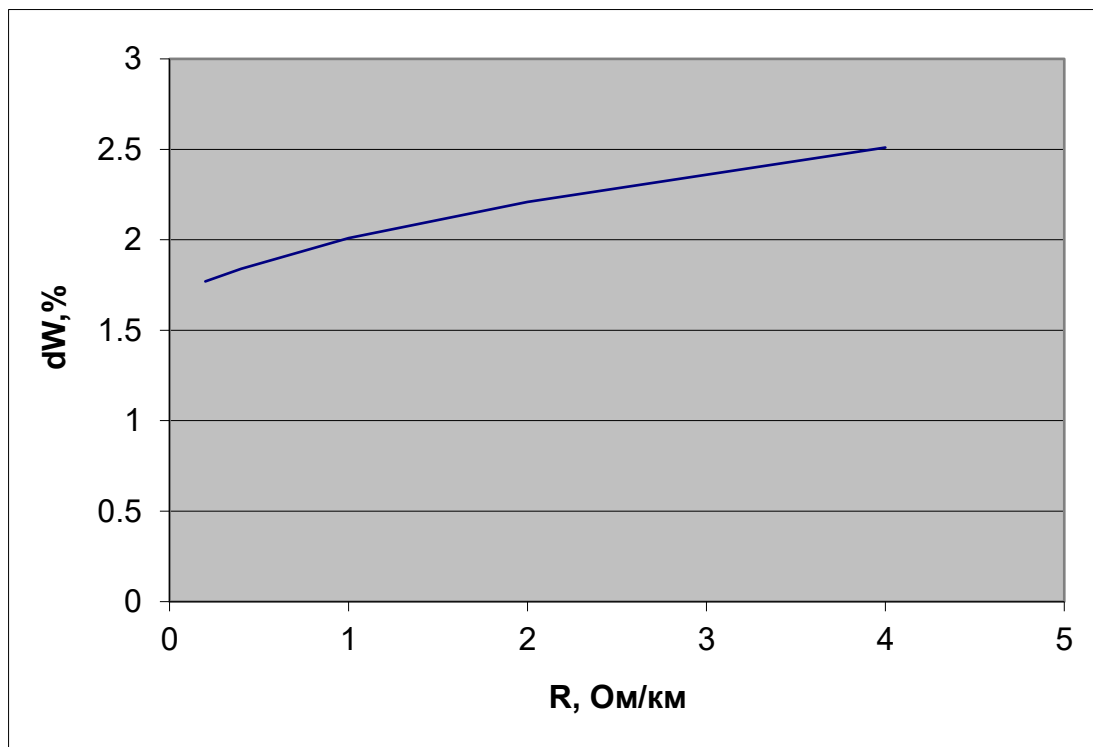


Рисунок 2.12 – Залежність втрат енергії від перехідного опору

Після проведених дослідів можна зробити такі висновки: зменшення будь-якої складової системи електропостачання знижує втрати енергії. Здавалося б, що максимального (лінійного) ефекту можна досягти, зменшивши опір контактної мережі, але виявляється, що це впливає меншою мірою, ніж опір рейкового ланцюга та перехідний опір рейок-земля. Це дозволяє зробити такі практичні висновки:

- для зменшення втрат енергії доцільно переходити на систему електропостачання з екрануючим та підсилюючим дротом. (Власний опір підвіски);
- зменшення перехідного опору перестав бути правильним рішенням, оскільки у рейці протікають не лише тягові струми;
- заміна стикових перемичок на рейках, застосування рейок більшої довжини та ревізія колії – ці заходи можуть знизити втрати на кілька відсотків (2-5 %). (Нелінійна залежність). Також цей захід підвищує безпеку.

3 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Частим явищем є нерівність напруг на суміжних тягових підстанціях на міжпідстанційних зонах тягових мереж системи міського електричного транспорту. Таке явище підвищує втрати електричної енергії за рахунок перерозподілу струму в контактних мережах. Підвищення енергетичної ефективності режимів роботи систем внутрішнього електропостачання при існуванні транзиту потужності через посередництво міжсистемних перетоків потребує застосування автоматичного регулювання напруги на ТП і введення в роботу раціональних компенсуючих пристроїв для енергопостачальних ліній тягових підстанцій [9 – 13].

Енергетична мережа представляє собою систему з великою кількістю вузлів, де входами і виходами є потоки активних та реактивних потужностей та величини напруги і струму (рис. 3.1). Залежно від будови системи змінюються і співвідношення між активною і реактивною потужністю і електротехнічними параметрами кожної вітки мережі [14 - 18]. Існує вагомий параметр, що характеризує ефективність передачі енергії в системі, він називається «середній шлях енергії».

Збільшення енергетичної ефективності систем тягового електропостачання міського електричного транспорту найрезультативніше шляхом підвищення напруги електроенергії, що подається на вводи тягових підстанцій. Тут можливий ряд нетрадиційних рішень. Наприклад, відомий зарубіжний досвід застосування напруги 20 кВ змінного струму для живлення тягових підстанцій міського електричного транспорту (Європа, США, Канада). Пропонується застосування напруги живлення тягових підстанцій 35 кВ. Але така система вимагає розробки нових типів міського транспорту, трансформаторів підстанцій і іншого обладнання.

В області проектування і конструювання рухомого складу міського електротранспорту таким рішенням є удосконалення конструкції силових напівпровідникових перетворювачів енергії і їх систем охолодження, а також використання асинхронних приводів і сучасних систем керування тяговими приводами. Цей резерв може скласти до 5 % економії електроенергії електротранспорту.

Системи електропостачання міськелектротранса були побудовані та використовувались протягом багатьох років у межах країни, які проектувались ще за старими нормативами та даними. Це базувалось на плануванні міст, обумовлювалось кількістю рухомого складу, його характеристиками, особливістю маршрутів тощо [28]. Однак з часом пасажиропотоки, технічні характеристики ЕРС змінилися в значній мірі, тому виникла необхідність у вирішенні питань найбільш ефективного використання уже діючої системи електропостачання в сучасних умовах експлуатації міського електротранспорту [29]. Аналіз електропостачання міського електричного транспорту свідчать, що цей транспорт потребує, по-перше, оцінки ефективності використання електроенергії при існуючому порядку експлуатації, і по-друге, розробки організаційно-технічних заходів щодо зменшення енергоспоживання з їх економічною оцінкою.

Система планування енергоспоживання, яка була раніше складовою частиною економічної моделі міського електротранспорту, спрямованої на зростання валових показників, не стимулює розробку та впровадження енергозберігаючих технологій, пошук шляхів виконання, заданих обсягів пасажирських перевезень з меншими витратами матеріальних, фінансових та енергетичних ресурсів. Такому стану також сприяли адміністративно встановлені пропорції між складовими експлуатаційних витрат і зокрема низькі тарифи на електроенергію [30].

На основі аналізу досліджень та складових витрат енергії, проведеного при оцінці ефективності її використання, можуть бути запропоновані такі рішення:

- перегляд маршрутів;
- раціональне розподілення рухомого складу на маршрутах;
- переглянути розташування зупинок з ліквідацією нераціонально розміщених та з малим пасажиропотоком;
- зміна схеми електропостачання, застосування 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 економічної ефективності даних заходів, доцільно проводити в натуральному обчисленні. Таким чином основним показником ефективності енергоспоживання слід вважати питомі витрати тобто витрати електроенергії на одиницю пробігу РС.

Вихідними даними для аналізу ефективності фактичного використання електроенергії є дані служби електрогосподарства, де фіксуються відомості про витрату енергії (в тому числі про витрату енергії на власні потреби підстанцій), і служби руху що надає інформацію про виконані пробіги РС за маршрутами, видах і типах рухомого складу, і їх відповідної частоти руху. Формування вихідних даних починається з розгляду маршрутної системи та схеми електропостачання. На кожному районі живлення за окремими маршрутами виділяють рухомі одиниці за типами і середньорічними значеннями їх частот руху в години пік.

Для впорядкування даних приймемо таку систему індексів: t - позначення виду або типу РС, а саме t_1 – трамвайні вагони Т-3; t_2 – трамвайні вагони Т6А5, t_3 – 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, E_1 – витрати енергії на власні потреби, кВт·год, T_1 - середньомісячна температура, °С.

Накладанням на маршрутну систему схеми електропостачання, виділяються райони живлення за числом тягових підстанцій.

Неоднорідність паралельно працюючих мереж 220, 110, 35, 10 кВ, специфічні режими їх експлуатації, особливо в періоди спаду пасажиропотоку

і перерозподілу навантажень у розподільних мережах середньої напруги, зводять до мінімуму переваги замкнених мереж електропостачання, що полягають у більшій надійності, кращій якості електроенергії і більшій економічності. У деяких випадках перетоки потужності в лініях досягають величин, несумісних з надійністю цієї лінії (нагрівання) або системи (стійкість), і вимагають диспетчерського регулювання [30].

З метою аналізу неоднорідних замкнених мереж розглянемо просте неоднорідне замкнуте коло з двох паралельних віток з відповідними опорами $\underline{Z}_1 = r_1 + jx_1$ та $\underline{Z}_2 = r_2 + jx_2$. Практично це відповідає випадку, коли до мережі однієї напруги з опором вітки \underline{Z}_2 при розвитку мереж підключена лінія більш високої напруги з опором вітки \underline{Z}_1 . При цьому струм I_2 може бути обмежений по умові нагріву проводів. В такому разі вітка з опором \underline{Z}_1 , що призначена для значного підвищення пропускної здатності мережі не дає ефекту.

Таким чином, невідповідність індуктивних опорів віток їх активним опорам приводе до зниження пропускної здатності мережі. Розподіл навантажень в мережі не вигідний (одна із віток завантажена повністю, а друга практично не завантажена). Отриманий розподіл навантажень не вигідний і по умовам економічності режимів.

В неоднорідній мережі більший активний струм протікає по вітці з меншим реактивним опором, та з більшим активним. Це одночасно приводе до великих втрат активної потужності та напруги. Слід відзначити, що неоднорідність мережі не завжди має місце та залежить від взаємного розташування навантажень і джерел живлення по мережі. Найбільш різко проявляється неоднорідність в випадках передачі великої транзитної потужності по мережі при паралельно включених (через трансформатори) ділянок різних напруг. Неоднорідність тягових і живильних мереж енергосистем призводить до збільшення еквівалентного активного опору R_e на шляху передачі енергії.

Розрахунки з реальними значеннями опорів дозволяють зробити висновок про те, що при паралельній роботі мереж 110 і 10 кВ, 220 і 35 кВ

доводиться чекати збільшення еквівалентного опору на 15–20 %. Отже, на 15–20 % більшими будуть втрати потужності. У загальному випадку для підвищення економічності роботи неоднорідної мережі можуть бути застосовані такі заходи: ділення мережі нижчої напруги, застосування подовжньо-ємнісної компенсації у лініях вищої напруги, включення вольтододаткових трансформаторів у ланцюги зв'язку мереж різної номінальної напруги. Найвигідніше рішення визначається шляхом техніко-економічних розрахунків на імітаційних моделях з урахуванням режимів роботи живильних енергосистем.

Одним із актуальних питань забезпечення енергобезпеки процесу перевезень є ефективна реалізація тягової електроенергетичної резервної потужності електропостачання тягових мереж міського електротранспорту. Шляхи реалізації резервної потужності різні. Якщо основним напрямком на міському транспорті країн з розвинутою економікою є розміщення на тягових підстанціях стаціонарних тягових резервних агрегатів, то на міському електротранспорті України це питання пропонується вирішувати за рахунок пересувних резервних ТП. Останні можна вводити в експлуатаційна період стійкого зростання обсягу перевезень. При спаді перевезень вони можуть бути задіяні на інших напрямках, на яких очікується зростання обсягів перевезень. Природно, що така «гнучка» система резервування повинна бути ув'язана схемно та режимно з СЗЕ.

Системний аналіз енергоефективності зовнішнього електропостачання ТП м. Дніпро виявив загальний недолік схем приєднання ТП електротягових мереж міського електротранспорту, який полягає в тому, що частина тягових підстанцій приєднані до мережі 6 кВ, а частина до 10 кВ, і деякі ТП мають вводи одночасно на 6 кВ та 10 кВ.

Явище перетоків потужності тяговими мережами як правило, залежать від зовнішнього електропостачання. Але і 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 їх малій кількості переток буде йти максимального значення. В цьому випадку необхідно розробити алгоритми швидкої оцінки перетоків потужності по тяговій мережі міського електротранспорту.

Паралельно працюючі електричні мережі 0,6 кВ і 10 кВ або 35 кВ являються різнорідними і передача потужності ними здійснюється при зростаючому значенні втрат активної потужності і електричної енергії. Отже має місце зниження економічності роботи систем електропостачання в цілому.

Процеси еквівалентних перетворень схем зовнішнього і внутрішнього електропостачання для розрахунку перетоків потребують виконання моделювання навантажень цих систем міського електротранспорту. Водночас енергосистема представлена значно складнішими схемами та розгалуженістю, ніж система внутрішнього електропостачання, саме тому моделювати її нелегко. До того ж режими роботи СЗЕ не бувають постійними. Вони постійно змінюються за годинами доби, і за місяцями і за роками. З огляду на таку невизначеність процес докладного моделювання зовнішнього електропостачання на предмет визначення перетоків потужності та обчислення втрат електроенергії у тяговій мережі міського електротранспорту має сенс тільки в надзвичайних випадках досліджень і прогнозувань.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ

Розрахунок відсотка втрат електроенергії у тяговій мережі.

Втрати електроенергії у тяговій мережі визначають за формулою:

$$\Delta W_T = \frac{r \cdot l \cdot W_T^2 \cdot 10^3}{U^2} \cdot \left(2,2 \cdot \alpha \cdot \frac{N_0}{N \cdot n} + \frac{n-1}{n} \right), \quad (4.1)$$

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:

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

4.2)

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:

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

(4.3)

де Θ - інтервал попутного прямовання;

V - середня швидкість поїзда, км/год.

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

(4.4)

де w_r - середньорічне питоме електроспоживання на 1 км експлуатаційної довжини головних шляхів, кВт год/км.

k - коефіцієнт потужності електровоза.

Відсоток втрат електроенергії в тяговій мережі дорівнює:

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

(4.5)

Підставимо в (5) вирази (3) та (4):

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

(4.6)

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 $l = 38$ 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.

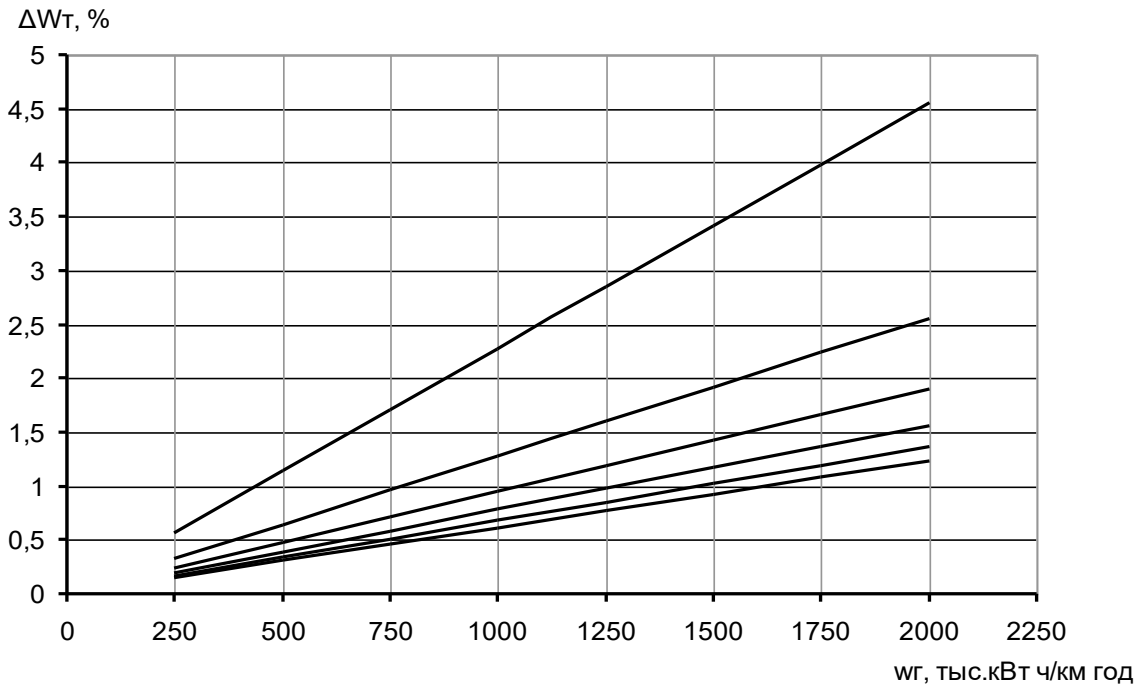


Рисунок 4.1 – Графік відсотка втрат електроенергії у тяговій мережі 1 по 25 кВ

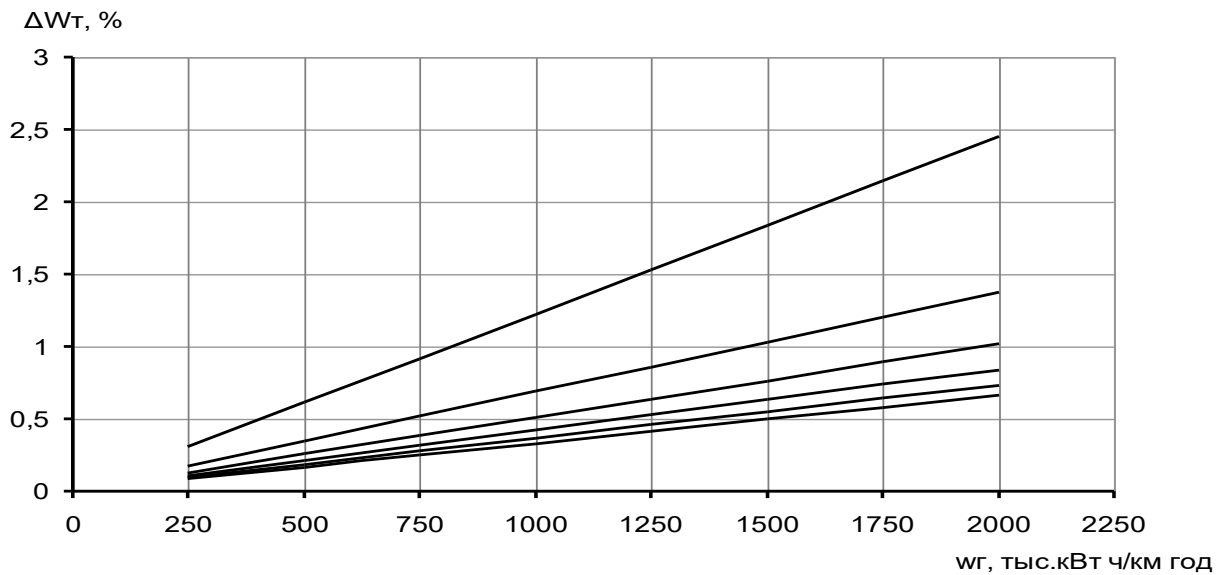


Рисунок 4.2 – Графік відсотка втрат електроенергії в тяговій мережі з екрануючим і підсилюючим проводом

З порівняння графіків видно, що відсоток втрат електроенергії в тяговій мережі з екрануючим і підсилюючим проводом за однакових умов більш ніж удвічі менше ніж у тяговій мережі 1 по 25 кВ.

Економія електроенергії.

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

(4.7)

За інших рівних умов втрати електроенергії прямопропорційні опорю 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 опорю тягової мережі с r_1 до r_2 економія електроенергії за рахунок зниження втрат електроенергії за одну добу ($T = 24$ ч) складе:

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

(4.8)

Економія електроенергії за рік на довжині 1 км дорівнюватиме:

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

(4.9)

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

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

(4.10)

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

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

(4.11)

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

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

(4.12)

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

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

(4.13)

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.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{Y} &= 20,29 \cdot (r_1 - r_2) \cdot 38 \cdot w_{\bar{A}}^2 \cdot 0,133 \cdot 60 \cdot \left(2,2 \cdot 1,2 \cdot \frac{N_0}{N} + \frac{38}{0,133 \cdot 60} - 1 \right) \cdot 10^{-6} = \\ &= 6,168 \cdot (r_1 - r_2) \cdot w_{\bar{A}}^2 \cdot \left(2,64 \cdot \frac{N_0}{N} + 3,76 \right) \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

(4.14)

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 пропускспром. N/No	Річна економія електроенергії ΔE , кВт год/км рік при середньорічному 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 економічної ефективності переходу від системи тягової мережі 1×25 кВ до системи з ЕУП скористаємося методом дисконтованого терміну окупності додаткових капіталовкладень з урахуванням фактора часу. Дисконтований термін окупності – це термін, за який окупляться первинні витрати на реалізацію проекту за рахунок доходів, дисконтованих за заданою процентною ставкою (крім прибутку) на поточний момент часу.

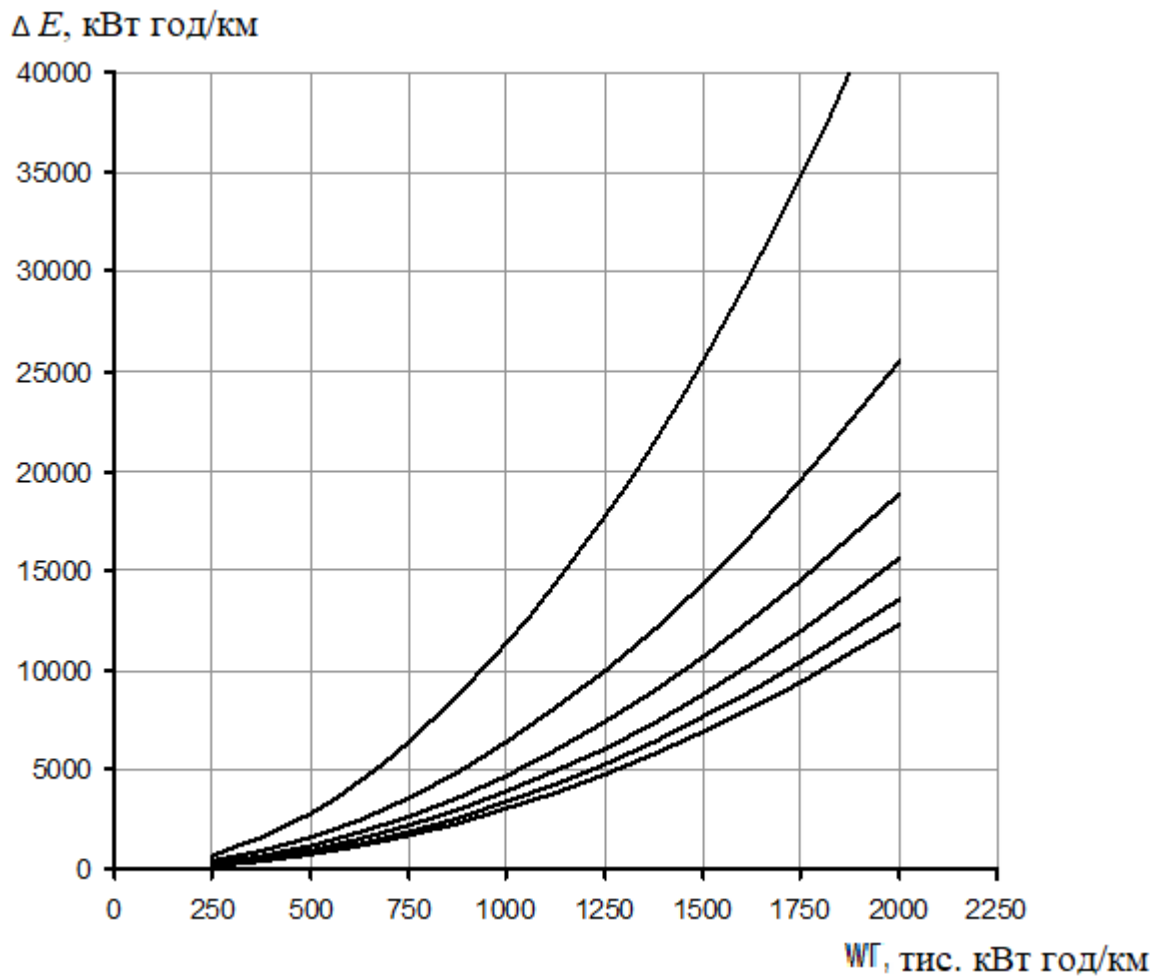


Рисунок 4.3 – Графік річної економії електроенергії, залежно від питомого електроспоживання

Сутність методу дисконтованого терміну окупності полягає в тому, що з початкових витрат на реалізацію інвестиційного проекту послідовно віднімаються дисконтовані грошові доходи з тим, щоб окупити інвестиційні витрати. Таким чином, дисконтований термін окупності включає таку кількість років реалізації інвестиційного проекту, яке необхідне для його окупності. Проект вважається економічно доцільним, якщо він окупається за економічно виправданий термін. В даний час економічно виправданим терміном вважається 6.25 років.

Розрахунок дисконтованого терміну окупності T здійснюється за допомогою виразу:

$$-K + \sum_{t=1}^T \Delta Z_t \geq 0, \quad (4.15)$$

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

$$\Delta Z_t = \frac{1}{(1 + E_{\text{НП}})^t} \cdot \left[\beta_2^t \cdot \beta_1^t \cdot \frac{C_e \cdot w_{\Gamma}}{100} \cdot (П_{\varepsilon_1} - П_{\varepsilon_2}) - \frac{\alpha_{\text{П}}}{100} \cdot K \right], \quad (4.16)$$

де $E_{\text{НП}}$ - коефіцієнт дисконтування, рівний прийнятною для інвестицій нормі прибутку на капітал;

β_{11} - коефіцієнт, що враховує щорічне зростання ціни на електроенергію;

β_{12} - коефіцієнт, що враховує щорічне зростання вантажопотоку;

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

$\alpha_{\text{П}}$ - амортизаційна квота для проводів, $\alpha_{\text{П}} = 2\%$.

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

Додаткові капіталовкладення відрізняються тільки на один підсилювальний провід А185. Капітальні вкладення визначаємо за такою формулою:

$$K = c \cdot Ц, \quad (4.17)$$

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

$Ц$ - ціна 1 км підсилювального та екрануючого проводів (А-185), $Ц = 23000$ грн. [22].

Визначення значення T за формулою (4.15) полягає у підсумовуванні наростаючого підсумку наведених експлуатаційних витрат доти, доки права частина виразу не стане більше лівою.

У розрахунках приймаємо: $E_{\text{НП}} = 0,1$; $\beta_{11} = 1,2$; $\beta_{12} = 1,05$, а також скористаємося середніми умовами за яких питоме електроспоживання

дорівнює $wr = 1500$, рівень використання пропускної спроможності $N/N_0 = 0,3$. Результати розрахунків щодо визначення дисконтованого терміну окупності зводимо 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	$-K = 26$	$-26 < 0$
1	$\Delta 31 = 1.53$	$\Delta 31 - K = -24,47 < 0$
2	$\Delta 32 = 2.71$	$\Delta 31 + \Delta 32 - K = -21.76 < 0$
3	$\Delta 33 = 3.41$	$\Delta 31 + \Delta 32 + \Delta 33 - K = -18.35 < 0$
4	$\Delta 34 = 4.30$	$\Delta 31 + \Delta 32 + \Delta 33 + \Delta 34 - K = -14.05 < 0$
5	$\Delta 35 = 5.42$	$\Delta 31 + \Delta 32 + \Delta 33 + \Delta 34 + \Delta 35 - K = -8.63 < 0$
6	$\Delta 36 = 6.83$	$\Delta 31 + \Delta 32 + \Delta 33 + \Delta 34 + \Delta 35 + \Delta 36 - K = -1.81 < 0$
7	$\Delta 37 = 8.58$	$\Delta 31 + \Delta 32 + \Delta 33 + \Delta 34 + \Delta 35 + \Delta 36 + \Delta 37 - K = 6.77$

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що ефективність переходу від системи 1×25 кВ до системи тягової мережі з екрануючим і підсилюючим проводами полягає в економії електроенергії в тяговій мережі, а термін окупності самого переходу невеликий і лежить практично в межах норми. З табл. 4.4 видно що дисконтний термін окупності 7 років, і зі збільшенням ступеня пропускної спроможності термін окупності зменшується.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Робота з охорони праці спрямована на виконання вимог Закону України «Про охорону праці», забезпечення безпечних умов праці, попередження виробничого та невиробничого травматизму професійних хвороб, а також на виконання нормативних документів з охорони праці.

Організація роботи з охорони праці в дистанції здійснюється на основі Системи управління охороною праці (СУОП), розробленої з метою забезпечення здорових умов праці, уникнення дії небезпечних та шкідливих виробничих факторів на працівників дистанції, попередження виробничого травматизму професійних хвороб, збереження працездатності працівників та забезпечення продуктивності їхньої праці.

Система управління охороною праці діє всі підрозділи дистанції.

Робота з охорони праці в структурних підрозділах здійснюється відповідно до цієї Системи на підставі розроблених нормативів власної участі керівників та фахівців у роботі з охорони праці.

Усі форми роботи за Системою управління охороною праці розроблені відповідно до Закону України «Про охорону праці», чинними Постановами КМУ вказівками Держнаглядохоронпраці.

Незалежно від посади керівники та службовці несуть відповідальність за стан охорони праці на ділянках роботи, якими вони керують.

Основні функції управління охороною праці.

- Організація та координація роботи з охорони праці;
- планування робіт з охорони праці;
- контроль за станом охорони праці;
- Облік, аналіз та оцінка стану охорони праці;
- Стимулювання.

Для управління роботою з охорони праці в дистанції використовується галузева та організаційно - методична форма управління. Галузеве керівництво роботою з охорони праці здійснюють керівники, їх заступники,

головні інженери залізниці, служб, дистанції та структурних підрозділів. Галузеві управлінські рішення для підлеглих структурних підрозділів мають обов'язковий характер. Організаційно - методичне управління роботою з охорони праці здійснюють: служби охорони праці залізниці, сектор охорони праці дистанції та фахівці з охорони праці або посадові особи, на яких покладено роботу з охорони праці в структурних підрозділах.

Планування робіт з охорони праці здійснюється в таких напрямках: розробка перспективних (п'ятирічних) комплексних планів, річних та оперативних квартальних планів з охорони праці, поліпшення умов охорони праці та виробничого середовища.

Основним видом контролю за станом охорони праці в дистанції є оперативний контроль, завданням якого є оцінка рівня утримання технологічних процесів, відповідність обладнання, машин, механізмів, засобів захисту, робочих місць вимогам безпеки, своєчасне виявлення порушень, порушників правил та норм охорони праці, вжиття до них відповідних заходів.

Облік, аналіз та оцінка стану охорони праці ведуться на підставі інформації про виконання планів заходів щодо подальшого поліпшення умов охорони праці, використання умов охорони праці, використання наказів та вказівок з охорони праці, стану охорони праці в структурних підрозділах, виробничий травматизм та професійні захворювання, забезпечення працівників спецодягом, спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту.

Матеріальне та моральне стимулювання за поліпшення умов охорони праці здійснюється відповідно з діючими на дистанції Положеннями про заохочення працівників за сумлінну роботу.

Кожен орган управління охороною праці у сфері своїх повноважень вирішує такі основні завдання:

- Організація навчання працівників безпечним методам праці;
- Забезпечення безпеки виробничого обладнання;
- Забезпечення безпеки технологічних процесів;

- забезпечення безпеки приміщень та споруд;
- Нормалізація санітарно - гігієнічних умов праці;
- забезпечення працівників спецодягом, спецвзуттям, засобами індивідуального захисту;
- Забезпечення оптимальних режимів праці та відпочинку працівників;
- Організація лікувально - профілактичного обслуговування праці.

Навчання проводиться відповідно до чинного в Україні Типового положення про навчання з питань охорони праці, затвердженого указом Держнаглядохоронпраці №27 від 17.02.99 (ДНАОП 0.00-4.12.99). Відповідальність за організацію навчання лягає на головного інженера дистанції, а контроль на відповідну службу охорони праці підрозділів та сектор охорони праці. Для організації та методичної роботи з навчання, пропаганди безпечних не шкідливих умов та профілактики виробничого травматизму професійних захворювань використовується вагон охорони праці та кабінети з охорони праці структурних підрозділів.

Надійність виробничого обладнання досягається шляхом виконання умов безпеки праці на стадіях проектування, виготовлення та експлуатації. Виконання вимог безпеки праці під час експлуатації обладнання забезпечують керівники структурних підрозділів.

Безпека виробничих процесів забезпечується шляхом виконання вимог безпеки праці при розробці технологічних процесів і в процесі виконання робіт. Відповідність технологічних процесів умовам роботи забезпечується під час їх розробки керівниками структурних підрозділів та відповідальними за проведення робіт.

Контроль за виконанням вимог безпеки під час експлуатації приміщень та споруд здійснюють організації, на балансі яких вони знаходяться, під час будівництва реконструкції – організації-замовники.

Безпека умов праці на робочих місцях, у виробничих і санітарно - побутових приміщеннях на територіях забезпечують керівники структурних підрозділів дистанції, шляхом виконання умов безпеки праці за утриманням

робочих місць, виробничих приміщень, територій, а також виконання санітарних норм під час виконання різних видів робіт.

Забезпечення працівників спецодягом, спецвзуттям, засобами індивідуального захисту проводиться відповідно до чинних норм. Видачу, збереження та підтримка у необхідному стані засобів індивідуального захисту організують керівники структурних підрозділів.

Виконання оптимальних режимів праці та відпочинку працівників забезпечують керівники структурних підрозділів дистанції відповідно КЗпП України. Працівники за роботу зі шкідливими, важкими умовами праці мають забезпечуватись пільгами (скорочений робочий день, додаткова відпустка, доплата тощо) відповідно до закону про працю.

Лікувально – профілактичне обслуговування працівників дистанції це: медичне обслуговування, проведення заходів щодо попередження захворювань, періодичні медогляди, що проводяться в медичних закладах залізниці. Керівник структурного підрозділу зобов'язаний організувати проведення первинного (при прийомі на роботу) та періодичних медоглядів працівників, зайнятих на важких роботах зі шкідливими або небезпечними умовами праці або таких, де є потреба у професійному підборі, а також річного обов'язкового медогляду осіб віком до 21 року.

Порядок навчання, перевірка знань працівників.

Працівники під час прийому на роботу та в процесі роботи повинні проходити за рахунок роботодавця інструктаж, навчання з питань охорони праці, з надання першої медичної допомоги потерпілим від нещасних випадків та правил поведінки у разі виникнення аварії.

Працівники, зайняті на роботах з підвищеною безпекою або там, де є потреба у професійному підборі, повинні щорічно проходити спеціальне навчання та перевірку знань відповідних нормативно-правових актів з охорони праці.

Організація навчання та перевірки знань з питань охорони праці працівників при підготовці, перепідготовці, підвищенні кваліфікації на

підприємстві здійснюється працівниками служби кадрів або іншими фахівцями, яким керівником підприємства була доручена організація цієї роботи.

Посадові особи, діяльність яких пов'язана з організацією безпечного ведення робіт, під час прийому на роботу та періодично, один раз на три роки, проходять навчання, а також перевірку знань з питань охорони праці за участю профспілкою. Тематичний план і програма навчання з питань охорони праці цієї категорії працівників складаються на основі Типового становища з урахуванням вимог охорони праці для конкретних галузей та виробництв.

Заступники керівників (на яких покладено обов'язки з управління охорони праці), фахівці служби охорони праці, члени комісії з перевірки знань з охорони праці цих органів, керівники та викладачі кафедр охорони праці вищих навчальних закладів, галузевих та регіональних навчальних центрів з охорони праці проходять навчання та перевірку знань у Головному навчальному центрі Держнагляддохоронпраці. Комісію з перевірки знань цієї категорії посадових осіб очолює Голова (заступник Голови) Держнагляддохоронпраці.

Керівники інших підприємств, організацій, їх заступники, виконання службових обов'язків яких пов'язано з організацією безпечного ведення робіт проходять навчання з питань охорони праці у галузевих навчальних закладах, а у разі їх відсутності – у навчальних закладах, які в установленому порядку отримали дозвіл органів Держнагляддохоронпраці на проведення відповідного навчання

Посадові особи та фахівці невеликих підприємств, де немає можливості провести навчання безпосередньо на підприємстві та створити комісію з перевірки знань з питань охорони праці, проходять навчання та перевірку знань у навчальних закладах, які отримали відповідний дозвіл органів Держнагляддохоронпраці. Допускається навчання цієї категорії посадових осіб та фахівців у порядку самостійного навчання, тоді перевірка їх знань проводиться в комісіях місцевих органів влади або Держнагляддохоронпраці.

При введенні в дію нових чи переглянутих нормативних актів охорони праці; при введенні в експлуатацію нового обладнання або впровадження нових технологічних процесів; при перекладі працівника на іншу роботу або призначенні його на іншу посаду, яка вимагає додаткових знань з питань охорони праці; а також на вимогу працівника органу державного нагляду за охороною праці, якщо виявлено незнання нормативних актів про охорону праці проводиться позачергове навчання та перевірка знань.

Керівники підприємств, посадові особи цехів, дільниць, виробництв, де сталася техногенна аварія або катастрофа, повинні протягом місяця пройти позачергове навчання та перевірку знань з питань охорони праці.

Посадові особи та фахівці, до службових зобов'язань яких входить безпосереднє виконання робіт підвищеної небезпеки та робіт, які вимагають професійного підбору, при прийнятті на роботу проходять на підприємстві первинне спеціальне навчання та перевірку знань з питань охорони праці щодо конкретних виробничих умов, а далі – періодичні перевірки знань у строки, встановлені відповідними нормативними актами про охорону праці, але не рідше одного разу на рік.

Програми первинного спеціального навчання розробляється відповідними службами підприємства з урахуванням конкретних виробничих умов та відповідних їм чинних нормативних актів про охорону праці та затверджуються його керівником.

Захисні заходи при перемиканні на ТП.

Робота персоналу під час обслуговування ТП 110/10 кВ пов'язана з можливим ураженням людини електричним струмом. Тому весь обслуговуючий персонал повинен пройти медичне обстеження, як при надходженні на роботу, так і періодично надалі.

На ЦП всі роботи виконує оперативний або ремонтний персонал строго за нарядом або за розпорядженням. Технічні заходи виконує допускаючий з кваліфікаційною групою не нижче IV.

- наряд видається оперативному персоналу безпосередньо перед початком підготовки робочого місця;
- наряд на роботу виписується у 2 екземплярах;
- наряд видається одного виробника робіт (спостерігача) з однією бригадою;
- склад бригади визначає особа, яка видає вбрання.

Технічні заходи щодо забезпечення електробезпеки роботи з ревізії масляного вимикача зводиться до відключення ремонтovanого вимикача В2 та вжиття заходів, що виключають можливість подачі напруги на нього під час роботи ремонтної бригади.

1. Оформляється наряд.

Для підготовки робочого місця допускаючий до роботи, призначений з числа чергового (оперативно-ремонтного) персоналу даної підстанції, заповнює бланк перемикачів у якому вказується наступна послідовність операцій, які слід зробити:

1) перевірити завантаження обмоток кожного трансформатора для визначення можливості відключення трансформатора Т1, допустивши на час робіт живлення всіх ліній, що відходять напругою 10 кВ від одного трансформатора Т2, перевантаження якого згідно ПТЕ не повинна перевищувати 40%;

2) включити секційні роз'єднувачі СР1 і СР2, а потім секційний вимикач СВ, після чого обидва силові трансформатори будуть перебувати в режимі паралельної роботи;

3) відключити ремонтований вимикач В2;

4) відключити роз'єднувач Р2 10 кВ з боку шин 10 кВ, замкнути його важільний привід на замок, а на рукоятку приводу повісити плакат “Не включати – працюють люди”;

5) відключити роз'єднувач РТ1 з боку трансформатора, замкнути його привід та на рукоятку приводу роз'єднувача повісити плакат “Не включати – працюють люди”;

- 6) відключити вимикач В1;
- 7) відключити роз'єднувач Р1;
- 8) у комірці вимикача В2 приєднати до заземлювального пристрою два комплекти переносних заземлень;
- 9) за допомогою покажчика напруги переконатися у відсутності напруги на всіх шести вводах відключеного вимикача В2 та накласти на них обидва комплекти заземлень;
- 10) на дверцятах комірки вимикача В2 повісити плакат “Працювати тут”.

Після перевірки підготовки робочого місця та інструктажу бригади відповідальний керівник робіт повинен розписатися в призначеному для цього місці в бланку наряду.

2. Бригада допускається на робоче місце.

3. За бригадою постійно спостерігає людина, яка стежить за правильністю дій та переміщень членів бригади.

4. Перерви в роботі, переведення бригади на нове робоче місце, закінчення роботи і здача-приймання робочого місця відбувається в строго встановленому порядку під керівництвом відповідальної особи.

ВИСНОВКИ

В представленій роботі представлено застосовані методики розрахунку втрат енергії на ділянках постійного та змінного струму системи енергопостачання, у двохобмоточних та трьохобмоточних трансформаторів, а також у лініях електропередач і в системі тягового електропостачання.

У роботі використовувалась комп'ютерна імітаційна модель. На підставі цієї імітаційної моделі за допомогою персонального комп'ютера була проведена імітація ділянки і показана залежність втрат енергії в тяговій мережі від різних факторів.

У роботі визначено основні чинники, що впливають на енергоефективність міського транспорту, до яких можна віднести тягово-енергетична система, рухомий склад, система обслуговування та ремонту рухомого складу, режими руху транспортних одиниць.

Показано, що паралельна робота різнорідних мереж є причиною зростання еквівалентного активного опору, через що відбувається збільшення втрат потужності (до 10 %).

Для рейкового міського транспорту запропоновано використовувати безстикові колії, що дозволить зменшити опір руху транспортним одиницям.

В економічній частині був запропонований варіант зменшення втрат енергії при переході від системи 1 по 25 до системи з екрануючим та підсилюючим проводами. Був розрахований відсоток втрат електроенергії в тяговій мережі, економія електроенергії та термін окупності цього переходу, який становить 7 років.

У розділі «охорона праці» досліджено низку питань, пов'язаних з організацією охорони праці в дистанції електропостачання. Здійснено аналіз управління охороною праці, порядку навчання та перевірки знань працівників, а також порядок перемикання живлення на тяговій підстанції.

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] / АBW.BY, URL: <https://www.abw.by/novosti/commercial/192528/> - 15.01.2018 р.
6. Говоров П. П., Харченко В. Ф., Говоров В. П. Автоматизація керування режимами міських електричних мереж: монографія. ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. 229 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. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 1. – 456 с.
9. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 2. – 364 с.
10. Павелчик, М. Сглаживание неравномерности потребления электроэнергии в энергосистемах при помощи накопителей энергии и

- определение параметров накопителей [Текст] / М. Павелчик // Второй Международный Симпозиум «Энергосбережение, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте», Москва, 2000: сборник трудов. – М., 2000. – С. 63-66.
11. 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.
 12. 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.
 13. Иванов, В.С. Перспективный тяговый привод электровозов [Текст] / В.С. Иванов, А.О. Линьков, О.В. Мельниченко // Транспортная инфраструктура сибирского региона. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2016. – Т. 2. – С. 514-517.
 14. 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.
 15. Сопов, В.И. Количественная оценка объемов энергии тяги и торможения на основе обработки экспериментальных данных [Текст] / В.И. Сопов, А.А. Штанг, Е.А. Спиридонов // Транспортные системы Сибири. Материалы II международной науч.-тех. конф. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2004. – С. 143.
 16. 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.
17. Малярєнко В. А. Енергозбереження як діючий важіль реформування житлово-комунального господарства // Коммунальное хоз-во городов.- Вып. 53. К.: Техніка, 2003.- С. 8-15.
 18. Далека В. Х. Оцінка ресурсовикористання на підприємствах міського електротранспорту // Коммунальное хоз-во городов.- Вып. 46. К.: Техніка, 2002.- С. 189-196.
 19. 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.
 20. О. С. Гордієнко, С. Ю. Андрєєв. Енергозбереження на підприємствах ЖКГ // *Коммунальное хоз-во городов: Научн.-техн. сб. : Выпуск 107.* – Киев: Техника. 2013. – С. 360 – 364.
 21. Неклепаєв, Б. Н. Електрична частина станцій та підстанцій. Підручник для студентів вузів.- М.: Енергія, 1976.-552с.
 22. Система тягового електропостачання 2х25 кВ / Б.М. Бородулін, М.И. Векслер, В.Е. Марський, В.И. Павлов. - М.: Транспорт, 1989. – 247 с.
 23. 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.
 24. Шидловський А.К., Кузнецов В.Г., Николаєнко В.Г. Оптимізація несиметричних режимів систем електропостачання. – К.: Наукова думка, 1987. – 174 с.
 25. 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.

26. Землянов В.Б. Енергооптимальні 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.
27. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 288 с.
28. Рене Пелисье Энергетические системы / Пелисье Рене: пер. с франц. [предисловие и коммент. В.А. Веникова]. – М. : Высш. шк., 1982. – 568 с.
29. Мельников Н.А. Реактивная мощность в электрических сетях // -М.: Энергия, 1975. – 128 с.
30. Правила устройства электроустановок. Разд. I. М.; — Энергоиздат, 1982. — 88 с.
31. Лившиц В.В. Выбор оптимальных решений технико-экономических расчетов.-М.:Экономика,1991г-255с.
32. 8. Гибшман А.Е. Сравнение вариантов технических решений.- М.:Экономика,1995г-340 с.

ДОДАТОК А

Демонстраційні матеріали до захисту магістерської роботи
**«Підвищення ефективності електроспоживання системи
міського електротранспорту»**