

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. Бекетова**

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури

Кафедра електричного транспорту

***Дослідження процесів перетворення та
накопичення енергії в системах міського
електричного транспорту***

Бакалаврська кваліфіційна робота

Здобувач Максим КОЗАКОВ

гр. СТ2023-1У

Керівник Василь ДАЛЕКА

д.т.н., професор

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра електричного транспорту
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ




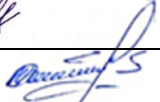
_____ Микола ХВОРОСТ
_____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Козакову Максиму Андрійовичу

1. Тема роботи: *Дослідження процесів перетворення та накопичення енергії в системах міського електричного транспорту* та керівник кваліфікаційної роботи *Далека Василь Хомич д.т.н., професор* затвержені наказом університету від 22.05.2026 №440-03
2. Строк подання бакалаврської кваліфікаційної роботи 10.06.2026 р.
3. Вихідні дані до бакалаврської роботи. *Технічні характеристики рухомого складу міського електротранспорту. Технічні дані спеціальних накопичувачів енергії. Нормативні вимоги до ресурсозбереження на електротранспорті., Літературні джерела з конструкції, експлуатації, обслуговуванню та ремонту електротранспорту*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
 - 4.1. Стан питання (огляд, аналіз, оцінка) *Загальні питання енергії та її перетворення. Схема перетворення енергії на рухомому складі та в системі електропостачання*
 - 4.2. Технічна частина.. *Характеристика перетворювачів енергії. Дослідження ККД перетворювачів енергії*
 - 4.3. Розрахункова частина. *Аналіз режиму рекуперації. При гальмуванні енергії.*
 - 4.4. Охорона праці.
5. Перелік графічного матеріалу. *Слайди з інформацією про перетворення енергії та пропозиціями до створення лабораторної установки для дослідження відповідних процесів.*

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Василь ДАЛЕКА, д.т.н., професор		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інженер		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доцент		

7. Дата видачі завдання 11.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Стан питання</i>	11.05 – 23.05.2026	
2	<i>Характеристика перетворювачів та накопичувачів енергії</i>	18.05 – 30.05.2026	
3	<i>Розрахункова частина</i>	25.05 – 06.06.2026	
4	<i>Охорона праці</i>	01.06 – 13.06.2026	
5	<i>Оформлення пояснювальної записки роботи</i>	08.06 – 13.06.2026	
6	<i>Підготовка доповіді та презентації</i>	08.06 – 13.06.2026	

Здобувач



(підпис)

Максим КОЗАКОВ

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи



(підпис)

Василь ДАЛЕКА

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота розглядає питання, що пов'язано з підвищенням рівня енергозбереження для підприємств міського транспорту на підставі найбільш раціонального використання енергії, яку можливо збільшити шляхом підвищення коефіцієнта корисної дії перетворювачів енергії та використання спеціальних накопичувачів енергії.

В роботі розглядаються головні процеси перетворення електричної енергії до механічної і навпаки, а також проблеми втрачання енергії.

У розділі охорони праці запропоновані комплексні заходи щодо гарантування безпечних умов праці в дослідницькій лабораторії.

Пояснювальна записка містить 61 стор., 17 рисунків, 14 таблиць, 23 літературних джерела. Графічна частина представлена презентацією з 12 слайдів..

Ключові слова: накопичувачі енергії, електричний транспорт, перетворення енергії, суперконденсатор, ресурсозбереження

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 СТАН ПИТАННЯ	8
1.1 Загальні питання енергії та її перетворення.	8
1.2 Схема перетворення енергії на рухомому складі та в системі електропостачання.....	16
2. ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА.....	19
2.1 Характеристика перетворювачів та накопичувачів енергії на транспорті.	19
2.2 Дослідження перетворювачів енергії електромашинних на предмет їхнього ККД.....	29
3. РЕЖИМ ГАЛЬМУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ З ПЕРЕТВОРЕННЯМ МЕХАНІЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНУ	46
4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	51
ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	57
ДОДАТКИ. Графічна частина. 12 слайдів.....	61

ВСТУП

Процес роботи громадського транспорту, який перевезить вантажі та пасажирів, не може створюватися без споживання енергії. Враховуючи, що під при цьому на пересування транспорт виконує механічну роботу, то потребується виконання перетворення енергії з одного виду до іншого.

Зазвичай природа надає нам енергію не в тій формі, в якій ми використовуємо її для конкретних цілей. Тому люди змушені трансформувати енергію, що маємо в розпорядженні. Для того, щоб отримати і виконати роботи люди мають знайти такі джерела енергії, тобто певні речовини, які перебувають у вигляді, що є найбільш придатним для реалізації різновиду енергії.

На сьогодні електроенергія, зазвичай, отримується за допомогою механічних пристроїв, які мають окремі частини, що під час руху мають значне тертя. Прикладами є електростанції, на яких хімічна енергія перетворюється в тепло завдяки окисненню палива, а атомні енергія перетворюється в ядерних реакторах завдяки ядерним перетворенням. Отримана через виділення тепла пара призводить у рух турбіни генераторів струму. Іноді цей процес є не вигідним, не тільки тому, що значна кількість енергії через тертя окремих деталей машин перетворюється у тепло і зникає частина корисної потужності, однак внаслідок того, що тепло, в цьому є проміжним продуктом в процесі перетворення енергії – вона може переходити до інших, потрібних видів енергії тільки, що мають низький коефіцієнт корисної дії. Тому є сенс перетворювати енергію, закладену в енергоносіях, до електричної енергії, минаючи етап тепла, так як електрична енергія має гарний ККД, для переведення в роботу. Це надає великі можливості для практичного здійснення найближчого майбутнього.

Одит з потенціалів полягає в тому, що деякі хімічні сполуки під дією світла можуть викликати спрямований рух електронів, тобто сприяє розвитку потоку струму. Цей процес називають фотоелектричним ефектом, який використовується в фотоелементах. В цьому випадку мова йде про перетворення

світлової енергії до електричної без виділення якоїсь значної кількості тепла. Практично світлове випромінювання Сонця можна таким способом перетворювати до електричної енергії без втрат. В дійсності через недосконалість фотоелементів їх діапазон роботи поки не перевищує ККД на рівні 10-12 %, отже, перетворюється до електричної енергії тільки 10-12 % падаючого на них випромінювання. Шлях широкого впровадження фотоелементів у техніку має і інші перешкоди, але в особливих умовах під час застосування в приладах, встановлених у віддалених пунктах, таких як космічні кораблі тощо вони є незамінними.

Гальванічні елементи сприяють майже повному перетворенню хімічної енергії до електричної, минаючи стан тепла.

На звичайних електростанціях витрати корисної роботи пов'язані не тільки з тим, що під час перетворення енергії вона спочатку перетворюється в тепло, але також через тертя, що супроводжується зношуванням твердих частин машин. Тому краще використовувати машини, в яких конструктивно не містяться тверді рухомі частини. Теоретично, а і якоюсь мірою і дісно такий пристрій можна реалізувати використанням термоелементів, що містять два різні спаяні між собою метали або напівпровідники, в яких тепло перетворюється в електричний струм безпосередньо.

На сьогодні транспорт використовує традиційні та нетрадиційні джерела енергії. Найпоширенішими є процеси перетворення електричної і теплової енергії до механічної.

Сучасні економічні умови господарювання у разі зростання витрат енергетичних, паливних та інших ресурсів, в умовах обмеження коштів особливо актуальним стає для підприємств транспорту розроблення та реалізація відповідних заходів, що забезпечують ресурсозбереження.

Метою цієї роботи є підвищення ефективності функціонування підприємств транспорту завдяки забезпеченню необхідного рівня ресурсозбереження шляхом зменшення втрат енергії на усіх етапах її перетворення.

1 СТАН ПИТАННЯ

1.1 Загальні питання енергії та її перетворення

Найпростішою діяльністю людини є доцільне змінювання первинних продуктів природи, забезпечення захисту від несприятливих умов зовнішнього середовища (холод; негода і дикі звіри) - вимагає першою чергою механічна робота. Велику роль для людини грає тепло - явище, яке пов'язане зі змінюванням енергії і у відомому сенсі подібне роботі.

Первісно-битова людина шукала їжу, створювала перші примітивні знаряддя, полювала, облаштовувала житло, при цьому застосовувала механічну роботу. Навіть зараз суспільство використовує енергію переважно у вигляді механічної роботи: у сільському господарстві і промисловості, побуті, будівництві й транспорті тощо. До того ж, ще й сьогодні дуже важливо отримувати механічну роботу, вироблену самою людиною.

Поряд з механічною роботою з давніх часів значну роль у житті людини мало тепло. У давнину, щоб отримати вогонь штучним шляхом, необхідно було витратити значну механічну роботу, щоб розтертиривавши сухе дерево забезпечити його розігрів до такої температури, щоб воно запалало. Ми і зараз використовуємо механічну енергію для отримання вогню, але ми маємо пристосування (сірники, запальнички), що дають змогу це робити з незначними витратами сил. Відкриття способу добування вогню мало великий крок у розвитку людства. Тепло, яке вивільнюється через хімічне перетворення і проявляється як вогонь, використовує сучасна людина не тільки для безпосереднього обігріву, але і як певну перехідну ступінь перетворення хімічної енергії до механічної роботи. Потрібно відмітити, що не завжди утворення тепла є бажаним. Однак будь-яке перетворення енергії більш-менш супроводжується утворенням тепла. З урахуванням того, що тепло не в змозі бути повністю перетвореним на роботу, в низці випадків (наприклад, під час тертя) його можна вважати енергією, що повністю втрачена для людини.

Стосовно *хімічної енергії*, то першим в історії людства хімічним процесом штучно викликаним було, мабуть, горіння - розкладання за допомогою окислення маси рослинної, яка характеризується складним хімічним складом, на речовини найбільше прості такі, як вода, вуглекислий газ тощо. Вогонь дав змогу людині використовувати і різновиди хімічних процесів: використання вогню допомогло людині зробити свої продукти харчування м'якими, смачнішими.

З часом люди навчилися застосовувати не тільки вогонь, але й деякі хімічні процеси. Але тільки до кінця 18 століття люди оволоділи користуванням законів природи так, що змогли штучно створювати хімічні процеси і проводити їхній процес цілеспрямовано. Однак тепер в більшості випадків мета цих процесів передбачало не розкладання речовин, тобто отримання більш простіших за своїм складом сполук, а навпаки, проведення синтезу речовин більш складного складу із простих «цеглинок». Звісно, що хімічне розкладання складних речовин не втратила свого значення жодною мірою: прикладом є виплавка металів з руди, у разі якої метали вивільняються із з'єднання. Продукція багатьох галузей промисловості є результатом розкладання речовини складного складання ндо більш простих. Перетворення певних хімічних речовин до інших супроводжується змінюванням хімічної енергії. Доцільне і гарно продумане застосування окремих видів енергії дає змогу в межах об'єктивних законів природи створювати планомірне керування хімічними реакціями. На цій базі останнім часом швидкого розвитку набула хімічна промисловість, що потребує все більших витрат енергії.

Стосовно світлової енергії, то: людина довгий час отримувала світлову енергію лише завдяки спалюванню (окисленню) нагрітих до палання твердих речовин. У масляних лампах, факелах, свічках, газових лампах і ліхтарях світло випромінюється або виникає в результаті неповного згоряння розпечених вугільних частинок, або введені до полум'я інших твердих речовин. В лампах розжарювання світло також дає розпечена тверда

речовина (нитка розжарення вольфрамова), однак в них світло випромінюється не завдяки звільненню окисного процесу хімічної енергії, а завдяки перетворенню електричної енергії до світлової.

Однак перетворення електричної енергії до світлової у разі допомоги тепла не є економічним. Тому зараз докладають зусиль щоб виключити тепло як посередника у разі цього перетворення. У сучасних освітлювальних приладах перетворення електричної енергії до світлової проходить без незначного виділення тепла, тому згадані прилади віддають у разі однакового споживання електричної енергії в 3-4 рази більше світлової енергії, ніж проти ламп розжарювання.

Електрична енергія. В енергетичному балансі високорозвиненого сучасного товариства електрична енергія відіграє більш значущу роль. В дійсності ми зрозуміємо, що непотрібна електроенергія є такою, оскільки ми не в змозі її ні сприймати, а ні безпосередньо споживати. Електричну енергію однак можна достатньо простими способами перетворити до тепла, механічної роботи або інших форм енергії. Виробництво електроенергії, тобто процес перетворення існуючих у природі, різних форм енергії до електричної, в більших осягах порівняно економічно вигідніше. Електрична енергія передається на значні відстані з практично малими втратами і, такотже, легко підводиться до споживачів, тому її вважають кращою і найбільш легко використовуваною формою енергії, завдяки якій наявні в природі енергетичні ресурси розподіляють відповідно з нашими потребами [2 - 4]. Нині електричну енергію виробляють зазвичай способом перетворення хімічної енергії нафти або вугілля спочатку в тепло, яке уможливорює отримання механічної роботи; за результатом цієї роботи і отримують надалі електричну енергію.

Незначна частина електричної енергії виходить не з виду хімічної, а з виду механічної (кінетичної і потенційної) енергії руху води на гідроелектростанціях. Останнім часом поширений метод отримання

електроенергії засобом перетворення атомної енергії до електричної, - однак в цьому втрати енергії у вигляді тепла є значними.

В сучасності мають також застосування, однак в дуже обмежених масштабах, такі види енергії, як магнітна та акустична

На транспорті для забезпечення вантажних та пасажирських та перевезень необхідно організувати джерела енергії, які безпосередньо, або завдяки відповідним перетворенням енергії гарантують виконання механічної роботи. Головні різновиди енергії та їхній взаємозв'язок у разі перетворення представлено на рисунку 1.1. та на слайді презентації 4



Рисунок 1.1- Головні різновиди енергії та їхній взаємозв'язок у разі перетворення

Перетворення енергії в механічних та теплових процесах

Розглянемо найпоширеніший спосіб перетворення енергії в теплових і механічних процесах.

Механічну енергію вважають кількісною характеристикою в механічному русі. Повною механічною енергією системи тіл є сума їхньої кінетичної і потенціальної енергій. У замкненій системі діє закон збереження кількості механічної енергії: повна механічна енергія системи тіл залишається постійною, якщо унеможливити вплив на них інших тіл. За цим кінетична енергія перетворюється до потенціальної та навпаки.

$$E_{\text{мех}} = E_k + E_n = \text{const} . \quad (1.1)$$

У природі та техніці спостерігається низка фізичних процесів та явищ, які характеризуються не лише перетворенням складників механічної енергії, а й взаємоперетворенням інших різновидів енергії. Механічні системи на практиці не є повністю замкненими. Зокрема, за рахунок виникнення сили тертя частка механічної енергії перетворюється до внутрішньої.

Таким чином, коли в ізольованій системі тіл створюються теплові процеси, то не зберігається її механічна енергія. Однак це не означає, що в цьому випадку порушений фундаментальний закон щодо збереження енергії. Зменшення кількості механічної енергії системи призводить до збільшення її внутрішньої енергії. В цьому разі змінювання механічної енергії тіл, які взаємодіють, кількісно дорівнює змінюванню їх внутрішньої енергії.

Тому повна енергія системи тіл $E_{\text{заг}}$ є сумою та внутрішньої енергії U та механічної енергії $E_{\text{мех}}$. Повна енергія складається не тільки з енергії макроскопічного руху та енергії взаємодії тіл, а й з мікроскопічної енергії руху та взаємодії частинок речовини.

Для системи закон збереження повної енергії, коли в системі відбуваються не тільки механічні, а й теплові (а можливо ядерні, хімічні та інші) процеси, формулюють за таким принципом: повна енергія замкнутої теплоізолюваної системи тіл завжди зберігається.

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{мех}} + U = \text{const} . \quad (1.2)$$

Отже, для всіх процесів і явищ у природі дотримується фундаментальна закономірність:

- «енергія у природі не виникає з нічого і безслідно не зникає. Вона лише перетворюється з одного виду до іншої, зберігаючи значення».

Коефіцієнт корисної дії процесів перетворення енергії

Перехід одного різновиду енергії до іншого може проходити різними способами. Якщо не враховувати технічні недосконалості, то можна стверджувати,

що з певної кількості енергії одного різновиду завжди створюється (коли виконано повне перетворення) цілком певна кількість іншого різновиду енергії незалежно від способу і впливу на це перетворення. Для наприкладу, з 1кГм механічної роботи виникає зазвичай 2,34 кал і з 1 кВт.г електричної енергії - 860 ккал тепла (якщо водночас не виникають інші форми енергії). Якщо в процесі перетворення створюються кілька різновидів енергії, необхідно враховувати суму енергій всіх її різновидів, що виражені в однакових одиницях вимірювання. З урахуванням цього, робимо висновок, що складовою частиною закону збереження енергії є закон перетворення енергії [2 – 4, 6].

Через те, що енергія є мірою руху тіла і його атомів і молекул, закон збереження енергії може бути сформульований так: рух зберігається і не може бути зупиненим, це є найважливішою властивістю матерії. Із закону перетворення енергії витікає, що існує багато різновидів руху, як механічний, тепловий, електричний тощо, які можуть перетворитися один до іншого, і завжди чітко дотримується принцип «еквівалентності», тобто під час цих процесів рух не скасовується, і не виникає із нічого.

Розгляд питання втрати енергії.

Так як є практичне використання енергії, то говорять про втрату енергії з погляду економіки. Однак ця втрата енергії не заперечує закон збереження енергії. Енергія, що є втраченою для економіки, і не перетворилася на ніщо означає, що частина енергії перетворилася не до тієї форми, яка нам в цьому випадку потрібна. Коли ми запускаємо парову машину, то це робимо з метою перетворити хімічну енергію як паливо (від вугілля, нафти тощо) в механічну енергію, так як в цьому випадку вона не є для нас цінністю. Однак, на практиці, в паровій машині в одночас з механічною енергією неминуче виникає тепло, яке в цьому випадку вважається втраченою енергією. Зазвичай, в інших випадках, якщо розглядати опалення, цінним є саме тепло. Але не слід робити висновок, що в печах немає втрати енергії. Тільки частина тепла, яке було отримано з хімічної енергії палива, достається до нашої

кімнати або безпосередньо опалювального котла, а значна частина йде до труби, просочується через стіни кімнати і вікна, і отже, втрачається.

Таким чином, втрати енергії ще не означають її зникнення, а тільки її перетворення до іншої, які не послуговують нашій меті і тому є марними. В цьому розумінні втрати енергії є подібними усім іншим втратам: якщо втратити капелюх або кишеньковий ніж, не означає скасування цих предметів, бо вони принесуть більшу користь іншим людям.

Розглянемо роль коефіцієнта корисної дії в процесах перетворення енергії.

Ретельно проведені наукові дослідження уможливають підтвердження еквівалентності різних різновидів енергії, сталості кількісних співвідношень у разі їхніх взаємних перетворень надійно. Зазначимо, що на практиці не дуже легко створювати умови для повного перетворення одного різновиду енергії до іншої, потрібної для будь-якої конкретної мети. Здебільшого утворюються ситуації непотрібні для визначеного випадку, а іноді виникають й шкідливі форми енергії. Для наприкладу, у пристроях, що мають рухомі макроскопічні частини, уникнути тертя, що супроводжується з виділенням тепла, ніяк не можна. Тепло здебільшого в конкретних випадках не використовується, а є зворотня дія, коли шкідливо впливає на матеріали конструкцій неминуче нагрівання. Тому на практиці необхідно обгрунтовано зазначати (в економічному сенсі) про оцінку коефіцієнта корисної дії в досліджуваних процесах перетворення енергії.

Коефіцієнт корисної дії для певного процесу перетворення енергії свідчить про частин вихідної енергії, що виражається в відсотках, що перетворюється до потрібної для нас форми енергії. Для прикладу, якщо ми визначаємо, що теплова електростанція забезпечує ККД у 35 %, це свідчить, що 35 % хімічної енергії, що вивільнюється під час спалювання палива, перетворюється до електричної енергії.

ККД у різних процесах або установках, в яких відбувається перетворення енергії, значно відрізняється один від іншого. Зазвичай, з найбільшим значенням ККД створюється перетворення у тепло. Електрична, механічна, хімічна та інші різновиди енергії можуть практично бути перетворені в тепло на 100 %. ККД під час

перетворення механічної енергії до електричної на гідроелектростанціях забезпечується досить високим значенням у 90...95 %. Гарний ККД ми можемо отримати також у разі безпосереднього (минаючи етап виникнення тепла) перетворення хімічної енергії до електричної в елементах гальванічних. Проте на сьогодні урахуваючи технічні труднощі, використання гальванічних елементів обмежено для отримання значної кількості електроенергії.

Значно гіршими справами під час переходу хімічної енергії до електричної є виконання цього процесу не відразу, а поступово: спочатку перетворюється вона у тепло, коли здійснюється механічна робота, а потім до електричної енергії. В таких випадках низьке значення ККД обумовлене не тільки труднощами з технічного погляду, а й специфікою самого процесу перетворення тепла до інших різновидів енергії.

Великі сучасні теплові електростанції, які створюють перетворення хімічної енергії, що звільнена під час спалювання палива до електричної з ККД 35 ... 40 %. Дизельні двигуни забезпечують ККД від 40 до 45 %, а значення ККД паровозів не перевищує 6...7 %. ККД освітлювальних приладів забезпечується ще нижчим: 40-ватна лампа розжарювання створює перетворення лише на рівні 1,5% електричної енергії до видимої світлової енергії; навіть найкращі лампи розжарювання володіють значенням ККД не вищим ніж 5 %. В газових лампах тільки незначна частина звільненої під час згоряння газу хімічної енергії створює перетворення до світлової.

Правомірно постає таке питання: якщо включити теплову енергію, як проміжну стадію під час перетворення хімічної енергії до роботи або до електричної енергії настільки вигідно, то чому так стається, що більша частина механічної роботи і електричної енергії на сьогодні проводяться за допомогою використання теплових двигунів (парових машин, бензинових та дизельних двигунів)? Причиною є те, що для розробки надійно працюючих теплових двигунів достатньо знати закони руху макроскопічних тіл, з урахуванням макроскопічних властивостей тепла. Для розробки ж гальванічних елементів, які не містять макроскопічних рухомих деталей,

що економічно і надійно працюють в умовах промислових масштабів, необхідно глибоко вивчати закони руху атомів, молекул і електронів.

Тільки в таким чином уможлиблюється створення значної кількості некоштовних гальванічних елементів, що гарантують надійну роботу в умовах виробництва. Через недостатності знань у цій сфері людство кожного року зазнає втрат енергії, розмір яких навіть не можна уявити і піддати оцінці. Тому країни з високорозвиненою економікою вкладають інвестиції у надзвичайно коштовні дослідження, щоб заповнити цю невивчену прогалину.

Теоретично процес перетворення енергії без проміжного етапу тепла можливий з ККД, що дорівнював би 100%. В сьогодняшній час ККД цих перетворень ще залишається низьким як через слабе знання механізмів мікропроцесів, що відбуваються у разі цих перетворень, так і завдяки відсутності відповідних матеріалів для створення потрібних пристроїв. Таких матеріалів в природі може не існувати, тому їх необхідно створювати штучно. Зазначимо, що процеси перетворення енергії в живих організмах відбуваються з достатньо високим ККД, але вони проходять завдяки участі речовин, що характеризуються надзвичайно складною структурою. Ці структури хімічних сполук і закони їхнього перетворення не вивчені людством настільки гарно, щоб застосовувати їх на практиці отримання енергії поза живих організмів. Люди поки ще не можуть синтезувати усі складні речовини у живих організмах і постачати їх для того, щоб використовувати у виробництві.

Досвід науки і техніки, що накопичувався тисячоліттями, та проведені незліченні експерименти привели людство до висновку, що енергія не виникає з нічого, і ніє зникає нікуди. Багато винахідників мріяли про машину, яка б виробляла механічну роботу, не маючи живлення від зовнішнього енергетичного джерела (перпетуум мобіле), але це так і залишилася мрією.

Цього факту достатньо було б для того, щоб сформулювати один з головних законів природи, що називають законом збереження енергії [4-6].

Тому у разі всіх перетворень енергії на транспорті доцільним є забезпечення максимально високого ККД різних ланцюгів перетворення.

1.2 Схема перетворення енергії на рухомому складі та в системі електропостачання

Міський електричний транспорт є досить складною виробничою системою яка включає рухомий склад (транспортні засоби), також системи електропостачання, керування рухом, колійне господарство, кінцеві станції, депо, тощо.

Електрифікований транспорт – значний і вагомий споживач електроенергії. Тому майже незначне зниження витрат енергії має суттєве значення. Витрата електроенергії на 1т·км в залежності від типу транспорту і профілю шляху коливається в дуже широких межах. Середнє значення питомих витрат електроенергії при експлуатації сучасного рухомого складу міського електротранспорту наступне: тролейбус – 120-200, трамвай – 40-90, метрополітен – 40-60 Вт·год / т·км.

Витрати та втрати електроенергії за елементами системи електропостачання і рухомого складу на 1 км шляху представлено на рисунках 1.2 та 1.3, слайд презентації 8.

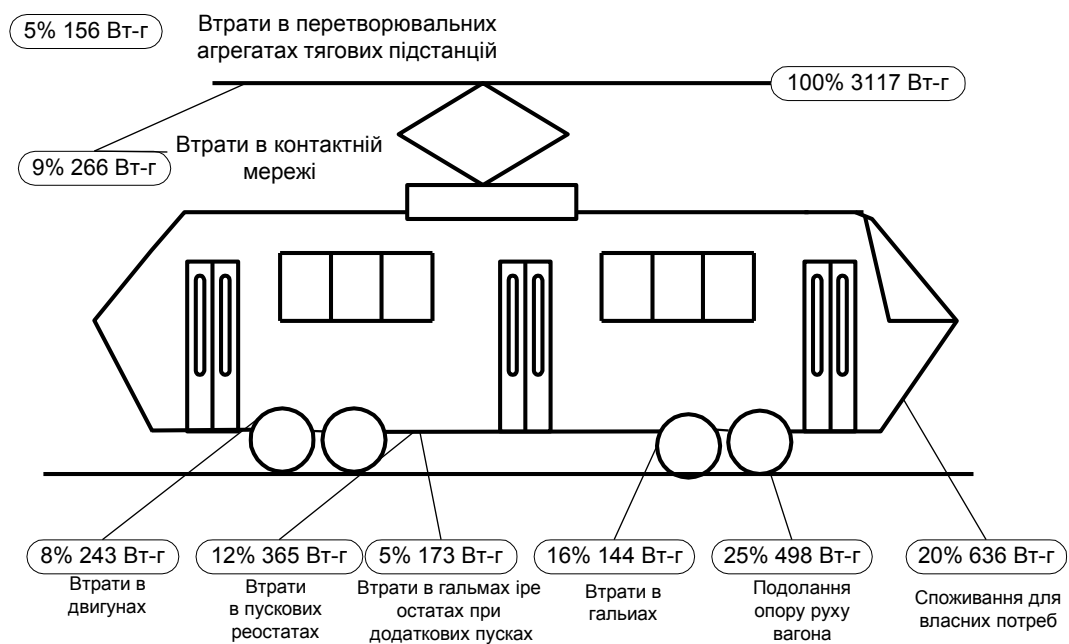


Рисунок 1.2 – Демонстрація середніх поелементних витрат електроенергії, що припадають на 1 км шляху, на якому експлуатується трамвайний вагон Т-3

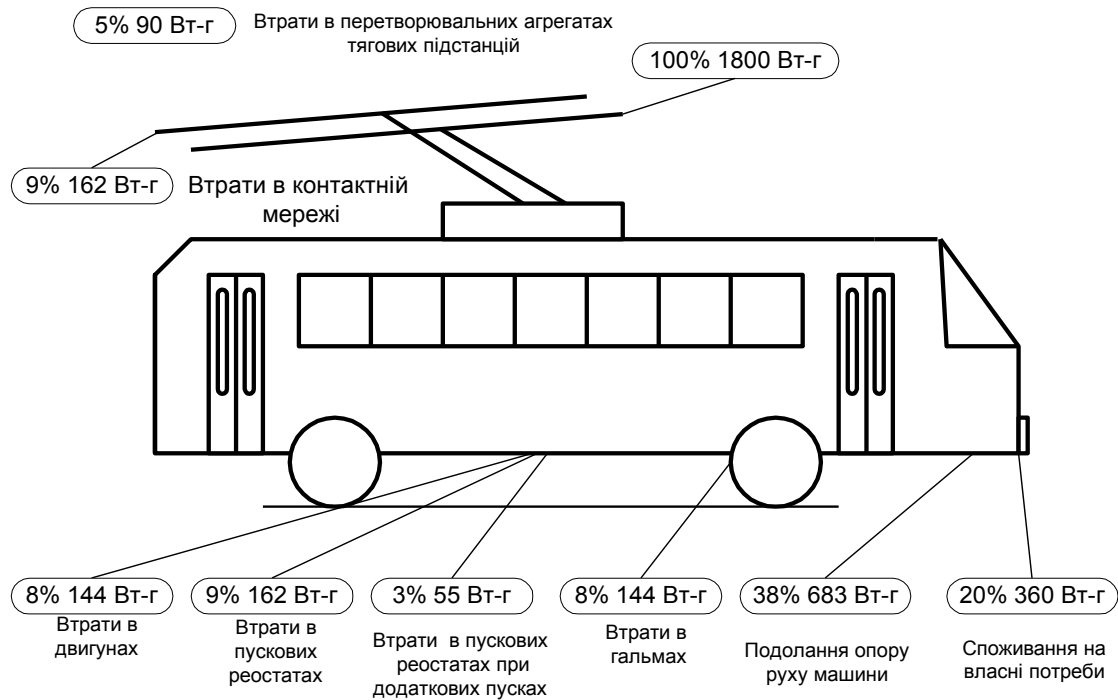


Рисунок 1.3 – Демонстрація середніх поелементних витрат електроенергії, що припадають на 1 км маршруту для тролейбусів ЗіУ– 9 і ПМЗ

Інформація на рисунках 1.2 та 1.3 свідчить про різноплановість перетворення енергії – електричної до механічної, теплової, хімічної, світлової та навпаки, а це викликає необхідність окремого вивчення процесів перетворення та організації накопичення енергії [2, 4 - 7, 9 - 12].

Оптимальним в експлуатації електричного транспорту є забезпечення пасажирських перевезень при високій якості їх обслуговування з вирішенням питань ресурсу збереження. Тобто всі ланки перетворення енергії повинні мати високий ККД або мінімальні втрати.

Як свідчать дані наведені на рис. 1.2 та 1.3 до 14 % електроенергії що споживається рухомим складом, витрачається на нагрівання обладнання тягових підстанцій (5%) та контактних проводів;(9%), тобто ми маємо великі втрати при переході електричної енергії в теплову при електропостачанні.

Також маємо втрати які не можемо повернути при переході на нагрівання гальмівних систем, реостатів, тягових двигунів тощо, До 20 % електроенергії витрачається на власні потреби, в тому числі і на заряд акумуляторних батарей (перетворюється в хімічну).

2 ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Характеристика перетворювачів та накопичувачів енергії на транспорті

Як свідчать дані рисунків 1.2 та 1.3 тільки 25 % електроенергії для трамваю та 38 % для тролейбуса використовуються безпосередньо для забезпечення руху, тому питання енергозбереження є досить актуальним. Експлуатація транспортних засобів з електроприводом дає змогу значного збільшення ефективності перетворення енергії, суттєво спрощення конструкції транспортних засобів та зниження шкідливих викидів речовин до навколишнього середовища [2 - 4, 6, 8-10].

Важливим аспектом конструювання електротранспорту є вибір необхідного джерела живлення для тягового електричного двигуна. Некоректно обрані параметри можуть призвести до погіршення перетворення енергії, збільшити масу транспортного засобу або викликать зменшення експлуатаційного терміну.

На сьогодні головними накопичувачами енергії на сучасному автономному електричному транспорті є:

- а) акумуляторні елементи;
- б) суперконденсатори або по іншому – іоністори;
- в) паливні елементи;
- г) акумулятори батареї тягові.

Електричний акумуляторний елемент є джерелом електричної енергії, що використовує перетворення хімічної енергії до електричної. Головна особливість полягає в зворотності внутрішніх хімічних процесів, що забезпечує його неодноразове циклічне використання (заряджання/розряджання) для накопичення енергії, щоб автономно жити різні електричні пристрої і обладнання, а також гарантувати резервне джерело енергії, особливо в медицині, в важливих виробництвах та в різних сферах промисловості.

Ємність акумуляторного елемента може бути відновлена шляхом заряджання, тобто пропусканням електричного струму в напрямку, що є протилежним напрямку струму під час розряджання. Якщо створюється об'єднання декількох акумуляторів до одного електричного ланцюга, то отримується складена акумуляторна батарея [3, 4, 6].

Акумуляторні батареї поділяють на кислотні (свинцеві) та лужні та літій-іонні акумулятори.

Кислотні акумулятори володіють високою номінальною напругою (2 В), невеликим внутрішнім електричним опірком та відносно високим ККД (до 85 %). Однак вони характеризуються порівняно невеликим терміном роботи та незадовільною роботою у раз низьких і високих температур, що обмежує їхнє застосування в країнах з холодним кліматом.

Лужні акумулятори характеризуються деякими перевагами перед кислотними: вони володіють більшою міцністю, не є такими чутливими до перевантажень, забезпечують задовільну працездатність в широкому діапазоні температур.

Головні недоліки цих акумуляторів: порівняно низький ККД (десь до 60 %) і низьке значення напруги (на рівні 1,2 В). Акумуляторні батареї цього різнотипу встановлюють, зазвичай, в пасажирських вагонах та електровозах [3].

Літій-іонні акумуляторні елементи (Li-Ion) – різнотип електричного акумулятора, який найпоширеніший в сучасній електротехніці і знаходить своє застосування як джерело енергії для живлення електричного транспорту та у накопичувачах енергії (рис. 2.1, слайд презентації 10).

До переваг літій-іонних акумуляторних елементів належить висока ємність та незначний саморозряд.

Характеристики літій-іонних акумуляторних елементів залежать від їхнього хімічного складу і перебувають в таких межах: напруга одного акумуляторного елемента: 3...7 В; питома ємність становить 110...243 Вт·год/кг; а робочою температурою є діапазон від - 20 °С до + 60 °С.



Рисунок 2.1- Електро-хімічні акумулятори, що використовують на електромобільному транспорті (акумуляторні елементи Nissan Leaf)

Батарея містить 48 модулів, а кожен модуль складається з чотирьох літій іонних батарейок по 3,8 В та 33,1 А.год кожна. Забезпечує це 30 кВт*год на 280 км пробігу.

Суперконденсатори або іоністори. Це електрохімічні пристрої, що містять конденсатор з необмеженим або обмеженим електролітом, обкладинками (електродами) з подвійним шаром на межі розділу електроду та електроліту. За характеристиками вони займають проміжний рівень між конденсатором та хімічними джерелами струму (рис. 2.2, слайд презентації 9) [3].



Рисунок 2.2- Склад і зовнішній вигляд іоністорів

Перевагами суперконденсаторів є:

- високий струм в процесах заряджання/розряджання;
- значна кількість циклів для процесів заряджання/розряджання;

- невелика вага в зрівнянні з електролітичними конденсаторами, що мають подібну ємність;
- низька токсичність матеріалів, що входять до складу;
- висока ефективність, так як ККД становить більше 95%;
- не мають полярності;
- працездатні за робочою температурою від -30°C до $+60^{\circ}\text{C}$;
- простота самого зарядного пристрою;
- значна перевантажувальна здатність.

Однак, суперконденсатори володіють і недоліками, а саме:

- високим внутрішнім опором;
- меншою питомою енергією, ніж у традиційні джерел (1...3 Вт·год/кг проти 30-40 Вт·год/кг для акумуляторних елементів);
- низькою робочою напругою (приблизно у 2, 0...2,5 В);
- порівняно висока ціна;
- Значно більшим саморозрядом у зрівнянні з акумуляторами;
- напругою, що залежить від рівня зарядженості.

У таблиці 2.1 продемонстровані порівняльні параметри і характеристики різнотипів акумуляторів та суперконденсаторів.

Таблиця 2.1 – Порівняльні дані накопичувачів енергії

Показники	Рінотип накопичувача			
	Кислотні АКБ	Лужні АКБ	Літій-іонні конд	
Питома енергія, Вт·год/кг	20...40	15...80	80...220	2...10
Максимальна питома потужність, Вт / кг	100...300	500...1300	800...3000	1500...12000
Ресурс і цикл	100...400	300...2000	500...2500	>1млн.
Термін експлуатації, років	2...10	2...15	5...10	>20
Робочий діапазон температур, $^{\circ}\text{C}$	-30...45	-40...60	-30...60	-50...70
ККД, %	70...85	65...80	80...95	>90
Потреба в обслуговуванні	Потрібне	Ні	Ні	
Цінова категорія, дол / кВт (від номінальної потужності)	50...150	75...400	200...400	1000...2000

Розглянемо особливості **паливних елементів**. Живлення від таких елементів є подібним батарейному живленню. Паливний елемент належить до електрохімічних пристроїв, що призначені для генерування електроенергії через хімічну реакцію з речовинами, що потрапляють до нього із зовні. Як пальне, зазвичай, використовують водень. Перевагами такого накопичувача вважають високу питому енергоємність, енергетичну ефективність та високу екологічність. До недоліків відносять такі особливості: висока вартість обладнання, не розвиненість необхідної інфраструктури та технічними проблеми, що стосуються зберігання та генерації водню [4, 11, 13].

Проаналізовані особливості джерел живлення для електричних транспортних засобів свідчать, що найкращим способом на сьогодні є забезпечення живленням від суперконденсаторів. Однак їхня велика вартість на сучасному етапі розвитку технологій в гібридних та електричних транспортних засобах гальмується, тому найбільшого розповсюджені у застосуванні залишаються акумуляторні батареї, що побудовані на базі літій-іонних акумуляторних елементах.

Розглянемо особливості маховичних систем. Для сучасного стану енергетики стаціонарної і автономної, значності набуває інтенсивний розвиток, що висуває підвищені вимоги до реалізації якісних показників в енергетичних установках [12 - 14]. В цьому напрямку підвищується роль застосування накопичувачів енергії, що вирішують цілу низку проблем, які пов'язані з накопиченням, зберіганням, перетворенням енергії, реалізацією оптимальних режимів працездатності устаткування, живленням споживачів з нестандартними параметрами тощо.

Накопичувачі енергії все більше застосовують в електроенергетичних системах, в енергетичних автономних установках, в мережах транспортних систем, технологічній апаратурі, бортовому устаткуванні та електрофізичних стендах.

Загалом накопичувач енергії є пристроєм, що дає змогу накопичувати в енергію будь-якого виду протягом тривалості заряду t_z , а потім передавати значну частину накопиченої енергії джерелу навантаження протягом тривалості розряду t_p . Взаємозв'язок параметрів накопичувачувального пристрою під час заряду і розряду визначається законом збереження енергії, що виражається співвідношенням [2]:

$$P_z \cdot t_z \cdot \eta = P_p \cdot t_p, \quad (2.1)$$

де P_z і P_p – усереднені значення потужностей процесів зарядження і розрядження;

η – ККД накопичувача.

Значення тривалостей t_z і t_p , а також енергетичні показники під час заряду і розряду можуть значно відрізнятися. Відповідно, існує декілька головних аспектів використання накопичувачів. По-перше, їхня головна роль може виражатися в акумулюванні надлишкової енергії у разі відключення переважної частини споживачів і подальшого використання накопиченої енергії в періоди, коли спостерігається інтенсивне енергоспоживання. У разі цього значення t_z і t_p отримують приблизно однакове значення, а показники енергії під час заряду і розряду стають досить близькими.

Як і для будь-якого різновиду накопичувачів енергії, характерними режимами роботи механічних накопичувачів є заряд-накопичення і розряд-віддача енергії. Зберігання енергії є проміжним режимом механічних накопичувачів. У зарядному режимі до механічного накопичувача енергії підводиться механічна енергія із зовнішнього джерела, водночас певну технічну реалізацію джерела енергії визначають різноманітними механічними накопичувачами. У разі розряду механічного накопичувача головна частина накопиченої енергії надходить споживачу. Кілька накопиченої енергії витрачається на компенсацію втрат, які виникають в розрядному режимі, а в більшості різновидів механічних накопичувачів – і в режимах зберігання.

Оскільки у низці накопичувальних установок тривалість заряду може значно перевершувати тривалість розряду (t_z , t_p), можливе виникнення істотного перевищення середньо-зарядної потужності P_p над середньо-розрядною потужністю P_z механічного накопичувача.

Таким чином, в механічному накопичувачі накопичувати енергію можна за допомогою малопотужних джерел. Основні різновиди механічного накопичувача підрозділяють на статичні, динамічні й змішані комбіновані пристрої [12].

Статичні механічні накопичувачі запасують потенційну енергію за рахунок пружного змінювання форми або об'єму робочого тіла або у разі його переміщення в протилежному напрямку дії сили тяжіння в гравітаційному полі. Тверде, рідинне або газоподібне робоче тіло механічних накопичувачів володіє статичним станом в режимі зберігання енергії, а заряд-розряд не призведе до руху робочого тіла.

Динамічні механічні накопичувачі акумулюють кінетичну енергію в масах твердих обертових тіл. Умовно до динамічних механічних накопичувачів відносять накопичувальні пристрої прискорювачів заряджених елементарних часток, в яких створює запас кінетична енергія електронів або протонів, що циклічно рухаються замкнутими траєкторіями.

Комбіновані механічні накопичувачі запасують водночас кінетичну і потенційну енергію. Прикладом комбінованого механічного накопичувача є маховик. Під час обертання маховика разом з кінетичною енергією запасується на ньому потенційна енергія пружної деформації. Для використання накопиченої енергії в такому механічному накопичувачі використовується обидві різновиди енергії.

За рівнем питомої накопиченої енергії, що припадає на одиницю маси або об'єму акумулюючого пристрою, динамічні інерційні механічні накопичувачі істотно перевершують деякі інші різновиди накопичувачів енергії (для наприкладу, індуктивні і ємнісні накопичувачі). Тому механічні

накопичувачі отримали значну практичну зацікавленість для різноманітних застосувань в різних сферах техніки.

Для інерційних механічних накопичувачів характерними є короткочасні режими розряду. Відбір енергії від механічного накопичувача супроводжується спаданням кутової швидкості маховика до допустимого рівня. В окремих гальмуваннях може відбуватися повна зупинка маховика. Можливі виникнення «ударних» розрядів, що характеризуються одноразовим або циклічним відборанням запасеної енергії, причому внаслідок значного кінетичного моменту і невеликого часу розряду механічного накопичувача зменшення кутової швидкості його ротора має відносно невелике значення, хоча потужність, яка віддається, може сягати достатньо високих значень. У такому режимі механічного накопичувача особливі вимоги пред'явлені до забезпечення міцності валу. Вплив крутного моменту на валу створює небезпечну дотичну напругу, а частка кінетичної енергії ротора перетворюється до потенційної енергії пружних деформацій на валу маховика.

Приведемо головні енергетичні співвідношення і оціночні параметри маховичних накопичувачів.

У разі будь-якого руху маси в принципі можна запасати рівняння кінетичної енергії. Під час рівномірного поступального руху тіла, що має масу M і рухається зі швидкістю v кінетична енергія визначиться як:

$$W_k = M \cdot v^2 / 2. \quad (2.2)$$

Питома енергія буде розраховуватися за формулою:

$$W_{num} = W/M = v^2/2, \quad (2.3)$$

тобто вона квадратично залежить тільки від лінійної швидкості тіла.

Для різноманітної енергетичної і транспортної експлуатації раціональними є механічні накопичувачі обертального руху – інерційні механічні накопичувачі (маховики), кінетична енергія яких визначається як

$$W_k = J \cdot \Omega^2 / 2, \quad (2.4)$$

квадрат кутової швидкості:

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot n, \quad (1.5)$$

де n – частота обертання;

J – момент інерції маховика відповідно осі обертання.

Якщо дисковий маховик володіє радіусом r і масою M , яка дорівнює:

$$M = \gamma \cdot V, \quad (2.6)$$

де V – об'єм матеріалу;

γ – густина матеріалу.

$$J = M \cdot r^2 / 2 = \gamma \cdot V \cdot r^2 / 2, \quad (2.7)$$

відповідно отримуємо

$$W = \pi \cdot 2n^2 \cdot \gamma \cdot V \cdot r^2. \quad (2.8)$$

Питома енергія на одиницю маси M або об'єму V складає

$$W_{num} = W_k / M = \pi^2 n^2 r^2, \text{ Дж/кг} \quad (2.9)$$

і

$$W_{0 num} = W_k / V = \pi^2 \cdot n^2 \cdot \gamma \cdot V \cdot r^2, \text{ Дж/м}^3. \quad (2.10)$$

Значення Ω і n у разі заданого розміру r обмежують лінійною швидкістю

$$v = \Omega \cdot r = 2\pi \cdot n \cdot r, \quad (2.11)$$

пов'язаною з допустимою розривною напругою σ_p матеріалу. Відомо, що напруга σ в циліндричному або дисковому роторі механічного накопичувача залежить від v^2 . В залежності від геометричної форми металевих маховиків характерними є допустимі значення граничної швидкості на периферії від 200 до 500 м/с [4].

Запропонуємо схему безпаливної електроенергетичної установки, яку продемонстровано на рисунку 2.3 та на слайді презентації 5, що бузується на силі інерції маховика, який розігнаний до робочої швидкості електричним двигуном. ДБСМ-1Е4-У4, що має потужність $P_d = 180$ Вт, напругу 220 В та частоту обертання вала у 1420 хв^{-1} .

Принцип дії схеми (рис. 2.3) полягає в розкручуванні маховика з подальшим підтримуванням його частоти обертання через блок пасових передач і крутить ротор генератора 32.3701, напругою 12 В, в 100 А год.

Маховик використовують з метою збільшити крутний момент. В цій схемі маховик не являється накопичувачем енергії, а є пристроєм, який забезпечує ефект розігнаної маси.

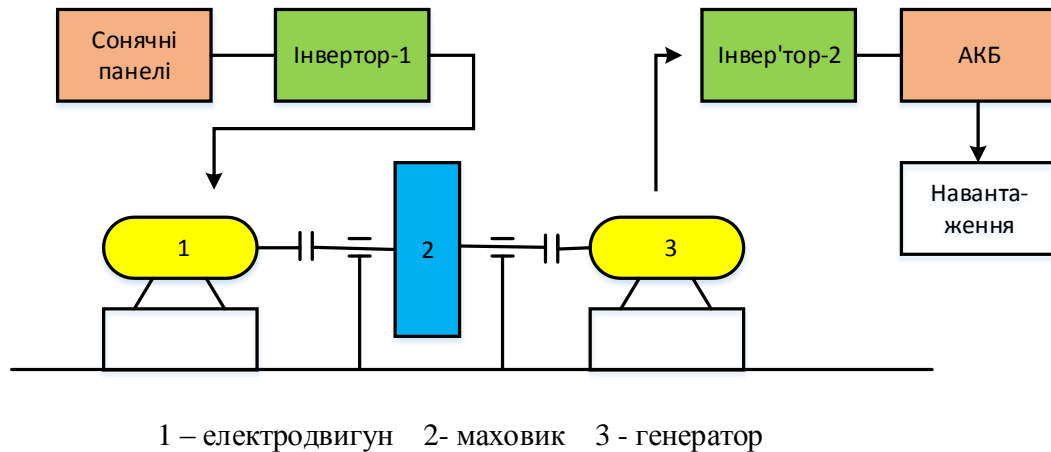


Рисунок 2.3 - Схема, що демонструє перетворення енергії в безпаливній електроенергетичній установці

В процесі роботи маса маховика віддає вектор сили і отримує необхідний вектор від електричного двигуна, а накопичена під час розгону енергія зберігається постійною, в результаті підтримки його частоти обертання електродвигуном – працюючий генератор здійснює гальмування системи, а електродвигун постійно підкручує систему, як утворюючи тим самим обороти як маховика так і генератора. Для забезпечення «підтримання» режиму частота обертів маховика має бути щонайменше в два рази більшою від частоти обертів ротора генератора. Підведення напруги до накопичувача здійснюють через штепсельні роз'єми, як мають ретельну ізоляцію провідників від блоку інверторів: один із інверторів дає змогу від акумуляторної батареї, що має ємність не менше 100 А · год, забезпечити роботу електродвигуна; другий забезпечує живлення споживачів, що мають напругу у 220 В; третій інвертор – в ненавантаженому або у малонавантаженому режимі створює підзарядку акумуляторної батареї.

Отже, застосування сили інерції маховика дає змогу створювати обертання генератор в стані навантаження, без втрат енергії, які б перевищували його розкручування. Однак, під час періоду розкручування витрат енергії можна запобігти завдяки розкручуванню маховика вручну, що уможливить полегшення моменту пуску електродвигуна.

В автономних електроенергетичних установках інерційні механічні накопичувачі можна задіювати як буфер, який створює компенсування пікової навантаженості генератора під час живлення електроспоживачів в системі, що потребує мобільного електропостачання. У разі стаціонарного компонування набори інерційних механічних накопичувачів, які долучені в схему паралельно, можуть збирати значний об'єм енергії, але головна перевага, що вони можуть виконувати це дуже швидко і також і швидко віддавати накопичену енергію.

Тому застосування маховиків на підприємствах транспорту як установок стаціонарних для забезпечення живлення власних технологічних потреб та виконання маневрових рушіїв на території депо, а також на борту рухомого складу є доцільним.

2.2 Дослідження перетворювачів енергії електромашинних на предмет хнього ККД.

У транспортних засобах електротранспорту основним рушійним елементом виступає тяговий електродвигун, у якому здійснюється процес перетворення електричної енергії в механічну. Характер даних процесів, а також втрати енергії при їх виконанні, визначаються технічними характеристиками двигуна, що, своєю чергою, впливає на його коефіцієнт корисної дії (ККД) [6, 14-16.

Отже, для аналізу ефективності тягового електродвигуна необхідно провести розрахунок таких ключових характеристик:

- параметри намагнічування;
- швидкісні та тягові характеристики;
- показник коефіцієнта корисної дії.

В якості базових показників для виконання обчислень використовуються технічні дані найбільш поширених трамвайних вагонів моделі Т-3, наведені у таблицях 2.2 та 2.3.

Таблиця 2.2 Вихідні дані

Величина	Значення
1	2
Коефіцієнт зчеплення колеса з чистими рейками, $\Psi_{\text{чист}}$	0,13
Коефіцієнт зчеплення колеса з брудними рейками, $\Psi_{\text{бруд}}$	0,03

Продовження таблиці 2.2

1	2	
Номінальна напруга, U_n , В	285	
Номінальна потужність, P_n , кВт	38	38000
Номінальний коефіцієнт корисної дії, η_n , %	93	0,93
Номінальна частота обертання, n_n , об/хв	1720	
Число витків обмотки збудження, W_{03} , витків	22	
Температура гарячого двигуна, Θ_2 , °С	110	
Число активних провідників якоря, N , провідників	295	
Передатне відношення редуктора, μ	7,43	
Діаметр якоря, D_a , мм	212	0,212
Діаметр колектора, $D_{\text{кол}}$, мм	197	0,197
Коефіцієнти ослаблення поля	$\gamma_{\text{оп1}}$	0,76
	$\gamma_{\text{оп2}}$	0,66

Таблиця 2.3. Значення величини:

Величина	Позначення	Значення	Розмірність
1	2	3	4

Температура холодного двигуна	Θ_1	20	°C
Опір обмотки якоря холодного двигуна	$R_{a20^\circ\text{C}}$	0,0545	Ом
Опір обмотки збудження холодного двигуна	$R_{o320^\circ\text{C}}$	0,026	Ом
Опір обмотки додаткових полюсів холодного двигуна	$R_{dp20^\circ\text{C}}$	0,0245	Ом
Коефіцієнт теплового опору міді	β	0,004	°C ⁻¹
Число паралельних гілок якірної обмотки	a	1	-
Число пар полюсів тягового двигуна	p	2	-
Падіння напруги на щітках	$\Delta U_{щ}$	2	В
Сумарна площа щіток	$\Sigma S_{щ}$	5	см ²
Коефіцієнт, що враховує тиск на щітку	$k_{тщ}$	0,6	-
Діаметр колеса	D_k	0,7	м
Довжина якоря	l_a	220	мм
Число моторних колісних пар на трамвайному вагоні	m	4	-
Індукція в якорі	B_a	1,1975	Тл

Продовження таблиці 2.3

Густина сталі	$\rho_{ст}$	$7,82 \cdot 10^3$	кг/м ³
Коефіцієнт додаткових втрат	k_d	0,6	-
Маса порожнього трамвайного вагону	$m_{пор}$	17,5	т
Маса завантаженого трамвайного вагону	$m_{зав}$	30	т
Прискорення вільного падіння	g	9,81	м/с ²
Коефіцієнт інерції обертальних мас	$(1+\gamma)$	1,12	-

2.2.1 Характеристики намагнічування тягового електродвигуна.

Теоретичні основи та практичне значення

Характеристика намагнічування визначає взаємозв'язок між магнітним потоком і струмом збудження або намагнічуючою силою полюсів. Під намагнічуючою силою розуміється добуток струму збудження на кількість витків обмотки збудження головного полюса. У практичних випадках характеристику намагнічування тягового двигуна часто подають у вигляді залежності між магнітним потоком машини і струмом збудження чи намагнічуючою силою полюсів.

Для отримання цієї характеристики можуть використовувати нормовані криві намагнічування, як представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.4 – Нормована характеристика намагнічування

№ з/п	I_a/I_H	F/F_H	Φ/Φ_H
1	0,1	0,1	0,3
2	0,2	0,2	0,55
3	0,3	0,3	0,69
4	0,4	0,4	0,764
5	0,5	0,5	0,823
6	0,6	0,6	0,87
7	0,7	0,7	0,91
8	0,8	0,8	0,945
9	0,9	0,9	0,971
10	1,0	1,0	1,0
11	1,15	1,15	1,0425

У цій таблиці надаються середні значення, що відображають залежність між магнітним потоком, струмом збудження або намагнічуючою силою, приведені до їхніх номінальних значень і виражені у відносних одиницях. Оскільки мова йде про тяговий двигун послідовного збудження, у режимі повного поля струм збудження збігається зі струмом якоря.

Отже, для визначення характеристики намагнічування необхідно спочатку обчислити номінальний струм тягового двигуна, номінальне значення магнітного потоку та відповідну номінальну намагнічуючу силу.

Струм тягового двигуна в номінальному режимі за формулою:

$$I_H = \frac{P_H}{U_H \cdot \eta_H}, \quad (1)$$

$$I_H = \frac{38000}{285 \cdot 0,93} = 143,37 \text{ А}$$

де P_H – номінальна потужність, Вт;

U_H – номінальна напруга, В;

η_H – номінальний коефіцієнт корисної дії двигуна у відносних одиницях.

Номінальну намагнічуюча сила:

$$F_H = I_H \cdot W_{oz}, \quad (2)$$

$$F_H = 143,37 \cdot 22 = 3154,1 \text{ А*витки}$$

де W_{oz} – число витків обмотки збудження

Розрахунок номінального магнітного потоку :

$$\Phi_H = \frac{U_H - I_H \cdot R_{дг}}{C_e \cdot n_H}, \quad (3)$$

$$\Phi_H = \frac{285 - 143,37 \cdot 0,1428}{9,8333 \cdot 1720} = 0,0156$$

де n_H – частота обертання двигуна в номінальному режимі, об/хв.;

C_e – конструктивна постійна машини, що залежить від її параметрів обмоту и якоря;

$R_{дг}$ – опір двигуна в горячому стані, Ом.

U постійна машини визначається за виразом:

$$C_e = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a}, \quad (4)$$

$$C_e = \frac{2 \cdot 295}{60 \cdot 1} = 9,8333$$

де p – число пар полюсів двигуна;

N – число активних провідників якорної обмотки двигуна;

a – число паралельних гілок якоря.

Опір двигуна який нагрітий в процесі роботи знаходять за формулою

$$R_{дг}=(R_{a20^{\circ}C}+R_{o320^{\circ}C}+R_{дп20^{\circ}C})\cdot\alpha, \quad (5)$$

$$R_{дг}=(0,0545+0,026+0,0245)\cdot 1,36=0,1428 \text{ Ом}$$

де $R_{a20^{\circ}C}$ – опір обмотки якоря двигуна в холодному стані, Ом;

$R_{o320^{\circ}C}$ – опір обмотки збудження двигуна в холодному стані, Ом;

$R_{дп20^{\circ}C}$ – опір обмотки додаткових полюсів двигуна в холодному стані, Ом;

α – температурний коефіцієнт, що визначається залежністю

$$\alpha=1+\beta(\Theta_2-\Theta_1), \quad (6)$$

$$\alpha=1+0,004\cdot(110-20)=1,36$$

де Θ_2 – температура двигуна який нагрітий в процесі роботи, $^{\circ}C$;

Θ_1 – температура двигуна на холодну, $^{\circ}C$

β – коефіцієнт теплового опору міді, $^{\circ}C^{-1}$.

Після визначення номінальних параметрів струму, сили намагнічування і магнітного потоку двигуна, необхідно помножити їх на відповідні коефіцієнти, наведені в таблиці 2.4. Отримані значення використовуються для заповнення таблиці 2.5, на основі якої проводиться побудова характеристик намагнічування $Ce\Phi=f(I_a)$ та $Ce\Phi=f(F)$.

Таблиця 2.5 – Дані для побудови характеристики намагнічування

I_a , А	F , А·витк	Φ , Вб	$Ce\Phi$, Вб
14,34	315,41	0,005	0,046
28,67	630,82	0,009	0,085
43,01	946,24	0,011	0,106
57,35	1261,65	0,012	0,117
71,68	1577,06	0,013	0,1267
86,02	1892,47	0,014	0,134
100,36	2207,89	0,014	0,140
114,69	2523,29	0,015	0,145
129,03	2838,71	0,015	0,149
143,37	3154,12	0,016	0,154

164,87	3627,24	0,016	0,160
--------	---------	-------	-------

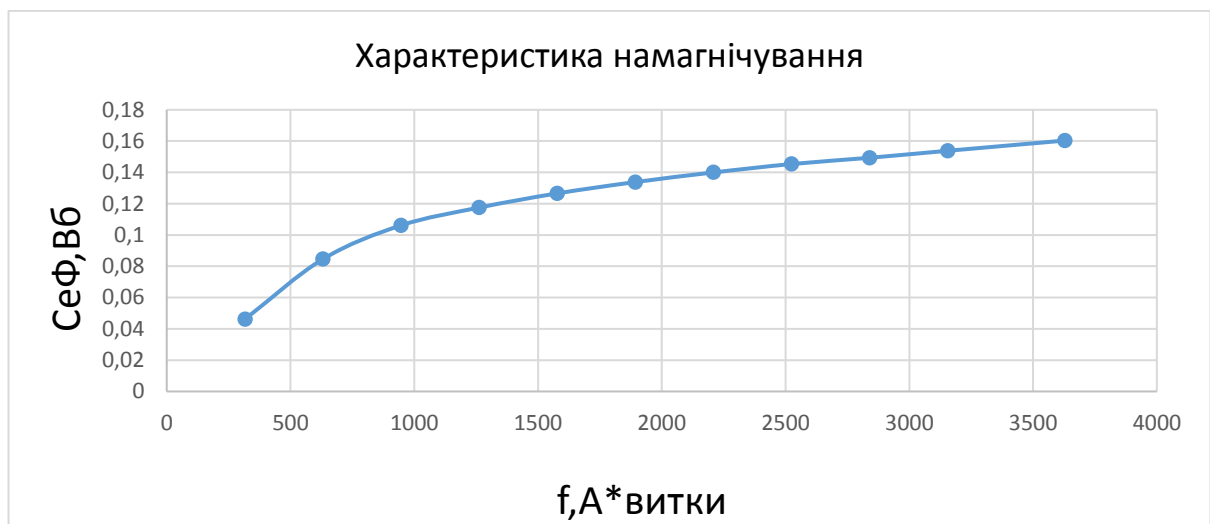
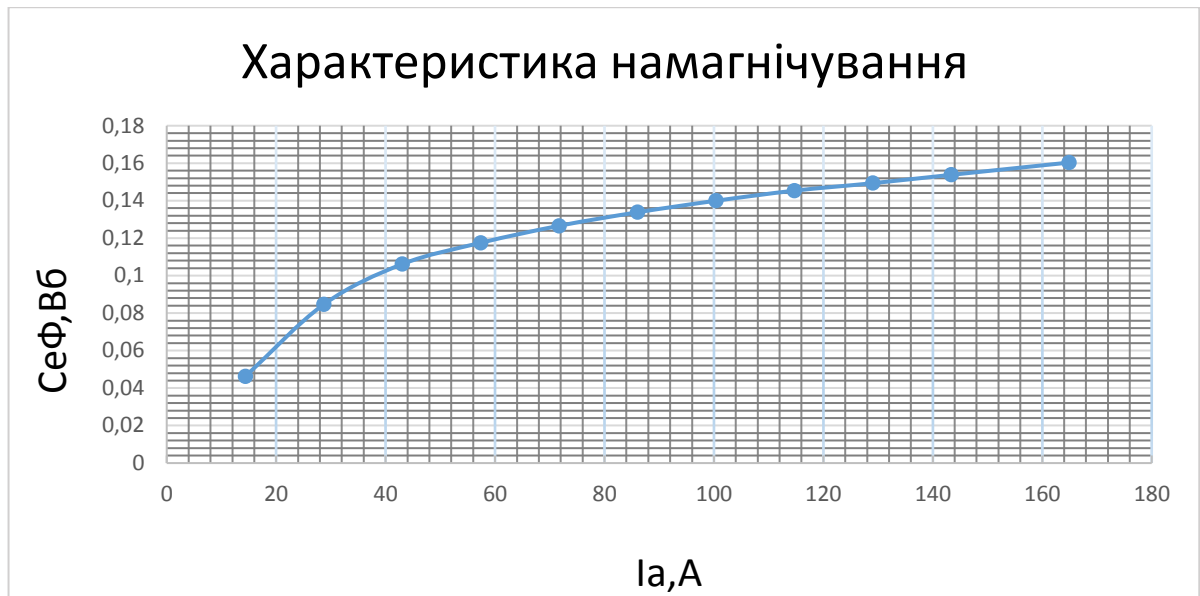


Рисунок 2.4 - Характеристики намагнічування двигуна постійного струму

$$C_e\Phi=f(I_a) \text{ та } C_e\Phi=f(F)$$

2.2.2 Розрахунок швидкісних характеристик тягового двигуна постійного струму при номінальному потоці збудження

Швидкісна характеристика тягового двигуна визначається як залежність частоти обертання валу від струму якоря.

Швидкість двигуна, об/хв визначається формулою

$$n = \frac{U_n - I_a R_{дг}}{C_e \Phi} . \quad (7)$$

Результати розрахунку кутової частоти обертання валу двигуна з номінальним потоком наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Результати розрахунку швидкісної характеристики при номінальному потоці збудження

I _a , А	I _a R _{дг} , В	C _e Φ, Вб	n, об/хв
14,34	2,05	0,046	6132,7
28,67	4,09	0,085	3320,9
43,01	6,14	0,106	2627,8
57,35	8,19	0,117	2355,9
71,68	10,24	0,127	2170,8
86,02	12,28	0,134	2038,2
100,36	14,33	0,140	1934
114,69	16,38	0,145	1848,3
129,03	18,43	0,149	1785,1
143,37	20,47	0,154	1720
164,87	23,54	0,160	1630,7

2.2.3 Розрахунок швидкісних характеристик двигуна при ослабленому потоці двигуна

Електромеханічні характеристики при послабленому полі машини дещо змінюється. Дані для побудови швидкісних характеристик на поослабленому полі 1 та 2 знаведені в таблицях 2.7 та 2.8.

У разі ослабленого магнітного поля до обмотки збудження електродвигуна підключається індуктивний шунт. Це підключення спричиняє зміну електричного опору гарячого двигуна R_{дг}. Така зміна пов'язана зі зміною характеристик обмотки через вплив індуктивності шунта, що, своєю

чергою, впливає на поведінку двигуна під час роботи. Цей ефект потрібно враховувати при проектуванні систем і підборі параметрів для оптимальної роботи двигуна.

Таблиця 2.7–Дані для побудови швидкісної характеристики на ослабленому полі

I_a, A	$I_{оз}, A$	$I_{aRдг}, B$	$C_e\Phi_{оп}, Bб$	$n_{оп}, об/хв$
14,34	10,9	1,93	0,031	9131,4
28,67	21,8	3,85	0,057	4923,8
43,01	32,69	5,78	0,085	3285
57,35	43,58	7,7	0,103	2692,2
71,68	54,48	9,63	0,115	2394,5
86,02	65,38	11,55	0,121	2259,9
100,36	76,27	13,48	0,13	2088,6
114,7	87,17	15,4	0,14	1925,7
129,03	98,06	17,33	0,145	1846
143,37	108,96	19,26	0,149	1783,5
164,87	125,3	22,14	0,155	1695,8

Таблиця 2.8–Дані для побудови швидкісної характеристики з зниженим потоком двигуна

I_a, A	$I_{оз}, A$	$I_{aRдг}, B$	$C_e\Phi_{оп}, Bб$	$n_{оп}, об/хв$
14,34	9,46	1,87	0,021	13482,1
28,67	18,92	3,75	0,041	6859,8
43,01	28,39	5,62	0,071	3934,9
57,35	37,85	7,5	0,089	3118
71,68	47,3	9,37	0,1	2756,3
86,02	56,77	11,25	0,11	2488,6
100,36	66,24	13,12	0,12	2265,6
114,7	75,7	15	0,125	2160,
129,03	85,16	16,87	0,132	2031,3
143,37	94,62	18,75	0,139	1915,5
164,87	108,82	21,5	0,145	1816,8

На ослабленому полі до обмотки збудження двигуна підключають індуктивний шунт, що призводить до зміни опору гарячого двигуна $R_{дг}$.

Опір індуктивного шунта

$$R_{іш} = \frac{\gamma_{оп} \cdot R_{о320^{\circ}C}}{1 - \gamma_{оп}}, \quad (8)$$

$$R_{іш1} = \frac{0,76 \cdot 0,026}{1 - 0,76} = 0,0823333 \quad \text{Ом}$$

$$R_{іш1} = \frac{0,66 \cdot 0,026}{1 - 0,66} = 0,05047059 \quad \text{Ом}$$

де $\gamma_{оп}$ – коефіцієнт ослаблення поля.

Тоді, з урахуванням підключення індуктивного шунта до обмотки збудження двигуна, опір гарячого двигуна при ослабленому полі зміниться наступним чином:

$$R_{дг}^{оп} = (R_{а20^{\circ}C} + \frac{R_{о320^{\circ}C} \cdot R_{іш}}{R_{о320^{\circ}C} + R_{іш}} + R_{дп20^{\circ}C}) \cdot \alpha, \quad (9)$$

$$R_{дг1}^{оп} = (0,0545 + \frac{0,026 \cdot 0,0823333}{0,026 + 0,0823333} + 0,0245) \cdot 1,36 = 0,1343136$$

$$R_{дг2}^{оп} = (0,0545 + \frac{0,026 \cdot 0,05047059}{0,026 + 0,05047059} + 0,0245) \cdot 1,36 = 0,1307776$$

Для обчислення частоти обертання двигуна на ослабленому полі застосовуються ті самі струми якоря I_a , що й у випадку повного поля. Проте для визначення магнітного потоку фослабл використовуються струми збудження, які визначаються за наступною формулою:

$$I_{оз} = I_a \cdot \gamma_{оп}. \quad (10)$$

Використовуючи розраховані значення струмів $I_{оз}$, за характеристикою намагнічування $\text{СеФ} = f(I_a)$ визначаю значення магнітного потоку СеФоп .

Число обертів двигуна при послабленому полі

$$n_{оп} = \frac{U_n - I_a R_{дг}^{оп}}{C_e \Phi_{оп}}, \quad (11)$$

Розрахунок за формулами (8)–(11) виконую для двох рівнів ослаблення поля, використовуючи $\gamma_{оп1}$ та $\gamma_{оп2}$ відповідно до поставленого завдання.

За результатами розрахунків були побудовані характеристики та наведені на рисунку 2.9 $n=f(I_a)$, $n_{оп1}=f(I_a)$, $n_{оп2}=f(I_a)$.

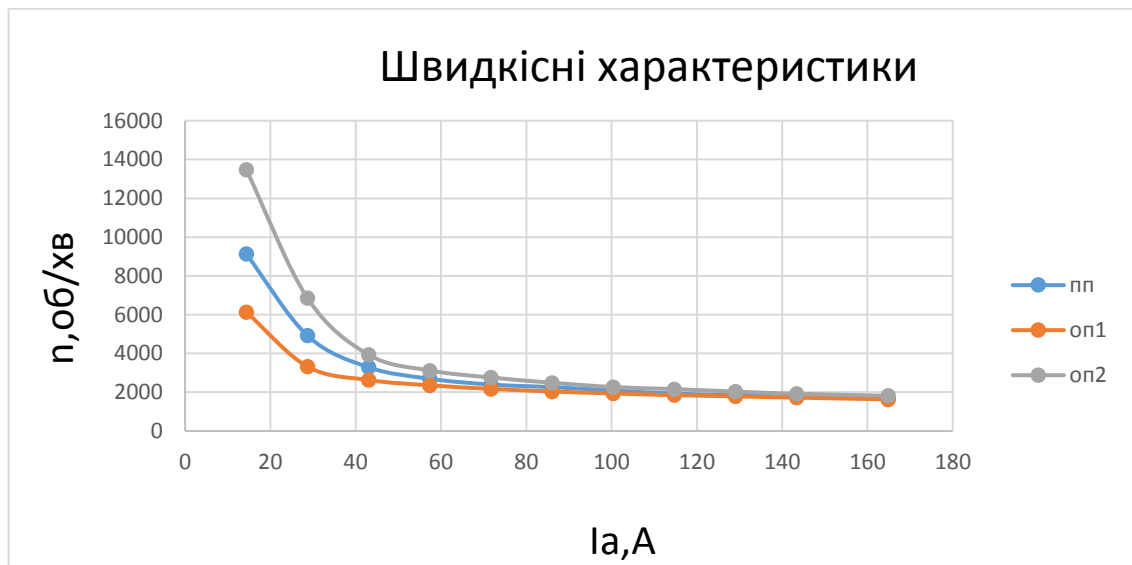


Рисунок 2.9- Електромеханічні характеристики $n=f(I_a)$, $n_{оп1}=f(I_a)$, $n_{оп2}=f(I_a)$

2.2.4 Розрахунок характеристик коефіцієнта корисної дії тягового електродвигуна

Коефіцієнт корисної дії (ККД) визначається як відношення корисної потужності до потужності, що споживається із зовнішньої мережі. Корисна потужність завжди менша за споживану, оскільки частина енергії втрачається в двигуні через різноманітні втрати. Ці втрати енергії, які виникають під час роботи двигуна, безповоротно розсіюються у формі тепла. Потужність енергії, яка йде на втрати, зазвичай називають втратами потужності.

Втрати в електродвигуні поділяються на дві основні групи: основні та додаткові. Основні втрати можуть бути класифіковані на механічні, магнітні (втрати в сталі) та електричні. Механічні втрати охоплюють втрати в підшипниках, втрати від тертя щіток об колектор, а також вентиляційні втрати.

Магнітні втрати пов'язані з осердям якоря та зубчастим шаром. Електричні втрати включають нагрівання обмоток двигуна і втрати в електричних контактах, зокрема в щітковому механізмі.

Аналіз і побудова характеристик коефіцієнта корисної дії двигуна вимагають проведення вимірювань у кількох режимах роботи. Зазвичай це режим повного збудження та два режими з ослабленням поля. Результати вимірювань заносяться до трьох таблиць (див. табл. 2.9–2.11), що дозволяє більш точно оцінити показники ефективності роботи двигуна.

Таблиця 2.9 – Результати розрахунку характеристики ККД. При номінальному потоці машини

I_a, A	$n, \text{об/хв}$	f	$P_{\text{підш}}$	$V_{\text{кол}}$	$P_{\text{тер.щ.}}$	V_a	$P_{\text{вент}}$	$P_{\text{мех}}$	P_a
14,3	6132,7	204,4	81,7	63,2	758,7	68,0	9449,7	10290,1	46,5
28,7	3320,9	110,7	81,7	34,2	410,8	36,8	1500,5	1993,1	16,8
43,0	2627,8	87,6	81,7	27,1	325,1	29,2	743,4	1150,3	11,7
57,3	2355,9	78,5	81,7	24,3	291,5	26,1	535,7	908,9	9,9
71,7	2170,8	72,4	81,7	22,4	268,6	24,1	419,1	769,4	8,8
86,0	2038,2	67,9	81,7	21,0	252,2	22,6	346,9	680,8	8,0
100,4	1934,0	64,5	81,7	19,9	239,3	21,5	296,4	617,4	7,4
114,7	1848,3	61,6	81,7	19,1	228,7	20,5	258,7	569,1	6,9
129,0	1785,1	59,5	81,7	18,4	220,8	19,8	233,0	535,6	6,6
164,9	1630,7	54,4	81,7	16,8	201,7	18,1	177,7	461,1	5,8

Продовження таблиці 2.9

G_a	$P_{\text{ст}}$	$P_{\text{мід}}$	$P_{\text{щіт}}$	P_e	P_d	ΣP	P	η
60,7	7613,5	29,4	28,7	58,0	4568,1	22529,7	4086,0	-4,5
60,7	2757,3	117,4	57,3	174,8	1654,4	6579,5	8172,0	0,2
60,7	1915,5	264,2	86,0	350,2	1149,3	4565,3	12258,1	0,6
60,7	1623,6	469,6	114,7	584,3	974,2	4090,9	16344,1	0,7
60,7	1437,3	733,8	143,4	877,2	862,4	3946,2	20430,1	0,8
60,7	1310,0	1056,7	172,0	1228,7	786,0	4005,5	24516,1	0,8
60,7	1213,6	1438,3	200,7	1639,0	728,1	4198,0	28602,2	0,9
60,7	1136,6	1878,5	229,4	2107,9	682,0	4495,6	32688,2	0,9
60,7	1081,2	2377,5	258,1	2635,6	648,7	4901,2	36774,2	0,9
60,7	1025,5	2935,2	286,7	3222,0	615,3	5365,7	40860,2	0,9
60,7	950,9	3881,8	329,7	4211,6	570,6	6194,2	46989,2	0,9

Таблиця 2.10 – Результати розрахунку ККД ослабленому полі 1

I_a, A	$n_{оп1}, об/хв$	f	$P_{підш}$	$V_{кол}$	$P_{тер.щ.}$	V_a	$P_{вент}$	$P_{мех}$	P_a
14,3	9131,4	304,4	81,7	94,1	1129,7	101,3	31194,7	32406,1	93,6
28,7	4923,8	164,1	81,7	50,8	609,2	54,6	4890,6	5581,5	32,0
43,0	3285,0	109,5	81,7	33,9	406,4	36,4	1452,3	1940,4	16,5
57,3	2692,2	89,7	81,7	27,8	333,1	29,9	799,4	1214,2	12,1
71,7	2394,5	79,8	81,7	24,7	296,2	26,6	562,5	940,5	10,2
86,0	2259,9	75,3	81,7	23,3	279,6	25,1	472,8	834,2	9,3
100,4	2088,6	69,6	81,7	21,5	258,4	23,2	373,3	713,4	8,3
114,7	1925,7	64,2	81,7	19,9	238,2	21,4	292,6	612,5	7,4
129,0	1846,0	61,5	81,7	19,0	228,4	20,5	257,7	567,8	6,9
143,4	1783,5	59,5	81,7	18,4	220,6	19,8	232,4	534,8	6,6
164,9	1695,8	56,5	81,7	17,5	209,8	18,8	199,8	491,3	6,1

Продовження таблиці 2.10

G_a	$P_{ст}$	$P_{мід}$	$P_{щит}$	P_e	P_d	ΣP	P	η
60,7	15340,4	27,6	28,7	56,3	9204,2	57007,0	4086,0	-13,0
60,7	5242,3	110,4	57,3	167,8	3145,4	14136,9	8172,0	-0,7
60,7	2710,2	248,5	86,0	334,5	1626,1	6611,3	12258,1	0,5
60,7	1987,8	441,7	114,7	556,4	1192,7	4951,2	16344,1	0,7
60,7	1663,8	690,2	143,4	833,6	998,3	4436,1	20430,1	0,8
60,7	1525,7	993,9	172,0	1165,9	915,4	4441,3	24516,1	0,8
60,7	1357,8	1352,8	200,7	1553,5	814,7	4439,4	28602,2	0,8
60,7	1206,0	1766,9	229,4	1996,3	723,6	4538,4	32688,2	0,9
60,7	1134,6	2236,2	258,1	2494,3	680,7	4877,4	36774,2	0,9
60,7	1079,9	2760,8	286,7	3047,5	647,9	5310,1	40860,2	0,9
60,7	1005,1	3651,1	329,7	3980,9	603,0	6080,3	46989,2	0,9

Таблиця 2.11 – Результати розрахунку ККД при ослабленому полі 2

I_a, A	$n_{оп1}, об/хв$	f	$P_{підш}$	$V_{кол}$	$P_{тер.щ.}$	V_a	$P_{вент}$	$P_{мех}$	P_a
14,337	13482,1	449,4	81,72	139	1667,96	149,58	100402	102151	191
28,674	6859,76	228,7	81,72	70,72	848,662	76,107	13224,8	14155	56,4
43,011	3934,86	131,2	81,72	40,57	486,805	43,656	2496,04	3064,6	22,1
57,348	3117,98	103,9	81,72	32,15	385,744	34,593	1241,89	1709,4	15,2
71,685	2756,25	91,88	81,72	28,42	340,993	30,58	857,869	1280,6	12,6
86,022	2488,64	82,95	81,72	25,66	307,884	27,611	631,466	1021,1	10,8
100,36	2265,63	75,52	81,72	23,36	280,294	25,136	476,464	838,48	9,35
114,7	2160	72	81,72	22,27	267,227	23,965	412,883	761,83	8,71
129,03	2031,25	67,71	81,72	20,94	251,299	22,536	343,365	676,38	7,95
143,37	1915,47	63,85	81,72	19,75	236,974	21,252	287,933	606,63	7,3
164,87	1816,81	60,56	81,72	18,73	224,769	20,157	245,695	552,18	6,77

Продовження таблиці 2.11

G a	P ст	P мід	P щіт	P e	P д	ΣP	P	η
60,7	31226,7	26,881	28,67	55,555	18736	152170	4086,02	-36,2
60,7	9245,38	110,431	57,35	167,78	5547,2	29115,6	8172,04	-2,56
60,7	3620,34	248,47	86,02	334,49	2172,2	9191,61	12258,1	0,25
60,7	2496,31	441,725	114,7	556,42	1497,8	6259,87	16344,1	0,617
60,7	2060,91	690,195	143,4	833,56	1236,5	5411,61	20430,1	0,735
60,7	1763,42	993,88	172	1165,9	1058,1	5008,47	24516,1	0,796
60,7	1531,52	1352,78	200,7	1553,5	918,91	4842,41	28602,2	0,831
60,7	1426,76	1766,9	229,4	1996,3	856,05	5040,93	32688,2	0,846
60,7	1303,47	2236,23	258,1	2494,3	782,08	5256,23	36774,2	0,857
60,7	1196,74	2760,78	286,7	3047,5	718,05	5568,93	40860,2	0,864
60,7	1108,89	3651,13	329,7	3980,9	665,34	6307,29	46989,2	0,866

Механічні втрати визначаються як :

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{підш}} + P_{\text{тер.щ}} + P_{\text{вент}}, \quad (12)$$

де $P_{\text{підш}}$ – втрати в підшипниках, Вт;

$P_{\text{тер.щ}}$ – втрати на тертя щіток об колектор, Вт;

$P_{\text{вент}}$ – втрати на вентиляцію, Вт.

Втрати в підшипниках визначаються як:

$$P_{\text{підш}} = 0,002U_{\text{н}} I_{\text{н}}, \quad (13)$$

Втрати під щітками

$$P_{\text{тер.щ}} = \sum S_{\text{щ}} \cdot 2p_{\text{щ}} \cdot k_{\text{тщ}} \cdot V_{\text{кол}}, \quad (14)$$

де $\sum S_{\text{щ}}$ – сумарна площа щіток, см^2 ;

$k_{\text{тщ}}$ – коефіцієнт, що враховує тиск на щітку;

$2p_{\text{щ}}$ – число щіткотримачів, приймається $2p_{\text{щ}} = 2p$;

$V_{\text{кол}}$ – лінійна швидкість колектору, м/с.

Швидкість колектору визначають за формулою

$$V_{\text{кол}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{кол}}}{60} \cdot n, \quad (15)$$

де $D_{\text{кол}}$ – діаметр колектора, м.

Вентиляційні втрати:

$$P_{\text{вент}} = 0,03 \cdot V_a^3, \quad (16)$$

де V_a – швидкість лінійна якоря, м/с.

Швидкість лінійна якоря дорівнює:

$$V_a = \frac{\pi \cdot D_a}{60} \cdot n, \quad (17)$$

де D_a – діаметр якоря, м.

Втрати в залізі якоря визначають за формулою:

$$P_{\text{ст}} = 2,7 \cdot (P_a G_a + P_z G_z), \quad (18)$$

де P_a – питомі втрати в якорі, Вт/кг;

P_z – питомі втрати в зубчастому шарі, Вт/кг;

G_a – маса якоря, кг;

G_z – маса зубчастого шару, кг.

Втрати в зубчастому шарі, а також його маса, є настільки незначними, що їх можна знехтувати в межах проведеного розрахунку.

Питомі втрати в якорі знаходять з емпіричної формули:

$$P_a = \left[0,044 \cdot f + 5,6 \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot B_a^2, \quad (19)$$

де f – частота перемагнічування заліза якоря, Гц;

B_a – індукція в залізі якоря, Тл.

Частоту перемагнічування f обчислюють із співвідношення:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} . \quad (20)$$

Маса якоря визначається за формулою:

$$G_a = \frac{\pi \cdot D_a^2}{4} \cdot l_a \cdot \rho_{ст} , \quad (21)$$

де l_a – довжина осердя якоря, м;

$\rho_{ст}$ – щільність сталі, кг/м³.

Отже, магнітні втрати будуть дорівнювати:

$$P_{ст} \approx 2,7 \cdot P_a G_a . \quad (22)$$

Електричні втрати знаходяться за виразом:

$$P_e = P_{мід} + P_{щіт} , \quad (23)$$

де $P_{мід}$ – втрати на нагрів при роботі обмоток, Вт;

$P_{щіт}$ – втрати у щітках, Вт.

Втрати на нагрів обмоток обчислюються:

$$P_{мід} = I_a^2 R_{дг} . \quad (24)$$

Опір працюючого двигуна змінюється залежно від режиму його функціонування (режим повного поля або ослабленого поля).

Втрати у щітках розраховуються як:

$$P_{щіт} = \Delta U_{щ} \cdot I_a , \quad (25)$$

де $\Delta U_{щ}$ – падіння напруги на щітках, В

Додаткові втрати відповідно до формули:

$$P_d = P_{ст} \cdot k_d , \quad (26)$$

де k_d – коефіцієнт додаткових втрат.

Сумарні втрати в двигуні визначають як:

$$\Sigma P = P_{мех} + P_{ст} + P_e + P_d . \quad (27)$$

Активна потужність, що береться з мережі, визначається як:

$$P = U_n \cdot I_a . \quad (28)$$

На основі попередніх обчислень маємо коефіцієнт корисної дії машини:

$$\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P} = \frac{P - \sum P}{P} = 1 - \frac{\sum P}{P}, \quad (29)$$

де $P_{\text{кор}}$ – корисна потужність (потужність на валу двигуна).

За результатами розрахунків побудовано три характеристики ККД $\eta=f(I_a)$, $\eta_{\text{оп1}}=f(I_a)$, $\eta_{\text{оп2}}=f(I_a)$.

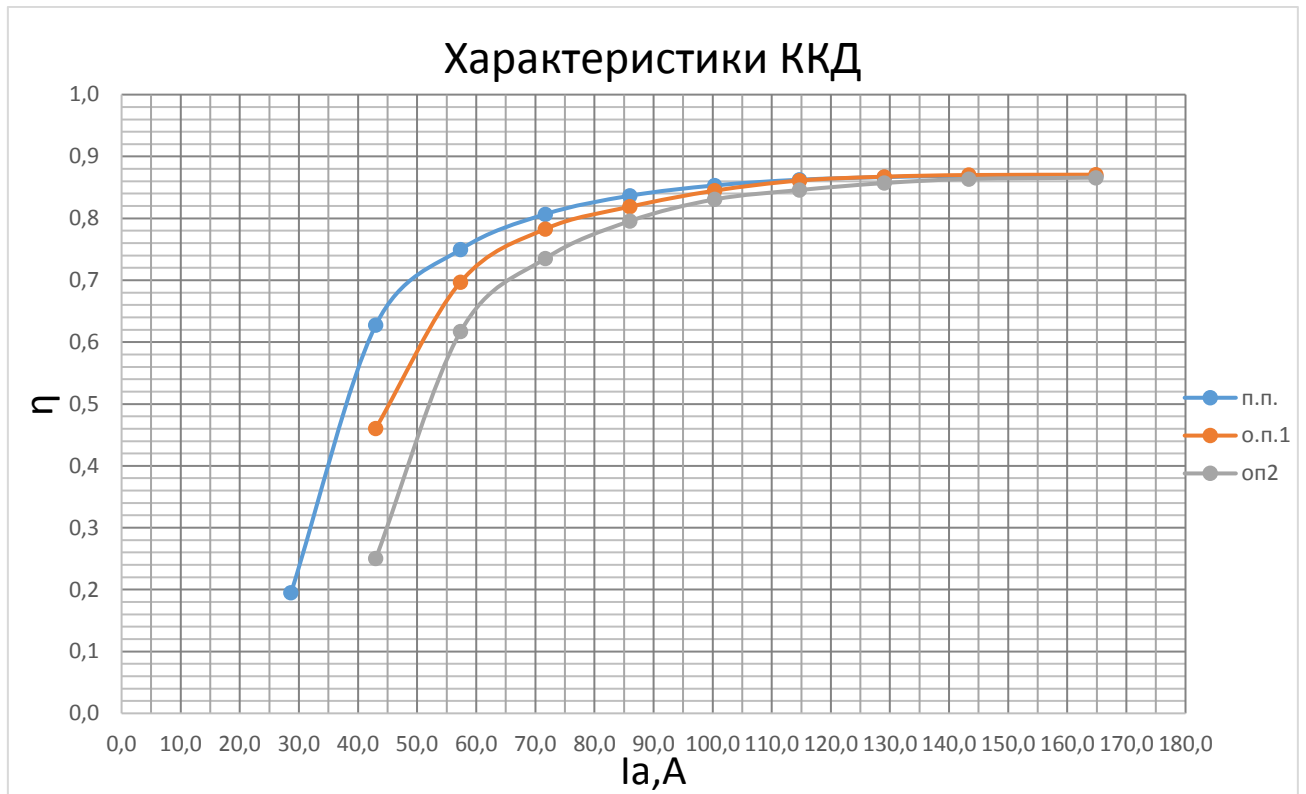


Рисунок 2.12 – Характеристика ККД $\eta=f(I_a)$, $\eta_{\text{оп1}}=f(I_a)$, $\eta_{\text{оп2}}=f(I_a)$.

Отримані залежності характеризують процеси функціонування електричного транспорту. потребу в ресурсах та процеси перетворення енергії.

3. РЕЖИМ ГАЛЬМУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ З ПЕРЕТВОРЕННЯМ МЕХАНІЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНУ

Найбільший потенціал енергозбереження припадає на гальмівні втрати, зокрема на кінетичну енергію, яка накопичується у кожній рухомій одиниці перед початком гальмування і яка надалі витрачається на нагрівання резисторів гальмівного реостата та на тертя в механічних гальмах. Неефективність такого перетворення електроенергії стала очевидною ще на початкових етапах впровадження електроприводів у наземному транспорті. Водночас, реалізація ідеї повторного використання електричної енергії, отриманої з кінетичної, тобто енергії рекуперації, була пов'язана з низкою технічних викликів [5-7, 14, 15, 17].

Ці виклики стосувалися як переходу тягових двигунів у генераторний режим зі збереженням потрібного рівня електрорушійної сили незалежно від зміни швидкості обертання якорів від початкового значення до нуля, так і забезпечення умов ефективного використання рекуперованої енергії. У період до появи силової електроніки на транспортному обладнанні, а також на рухомому складі з реостатно-контакторним керуванням, забезпечення генераторного режиму тягових двигунів із рівнем електрорушійної сили, що перевищує напругу контактної мережі при підтримці сталого моменту на якорі в усьому діапазоні швидкостей, було практично неможливим. Застосування двигунів із переважною намагнічувальною силою паралельних обмоток на міському електротранспорті (трамваї РВЗ-6, РВЗ-6М, РВЗ-6М2, тролейбуси МТБ-82Д, ЗіУ-5), які дозволяли реалізувати рекуперативне гальмування на швидкості не менше 24 км/год., не привело до істотного зменшення енергоспоживання. Це пояснювалося тим, що схеми управління передбачали виконання рекуперативного гальмування лише на позиціях розбігу, що ускладнювало роботу водіїв.

Крім цього, навіть незначну економію енергії було важко реалізувати через низьку ймовірність одночасного існування адекватної потужності

споживання для використання всієї рекуперованої потужності в межах одного живильного району чи секції. Через це проблема ефективного застосування рекуперованої енергії залишається актуальною навіть за умов впровадження сучасних електронних перетворювачів енергії, які дозволяють виконувати рекуперацію аж до повної зупинки транспортного засобу, та нових типів накопичувачів енергії [222-234]. Також відсутнє чітке рішення щодо доцільності розміщення накопичувачів електроенергії безпосередньо на транспортних засобах або ж у системі тягового електропостачання [5-7].

У сучасних дослідженнях недостатньо уваги приділяється втратам в елементах силового приводу та систем електропостачання під час зворотного перетворення механічної енергії в електричну. Як зазначалося в п. 2.2, лише в контактній мережі та тягових підстанціях у номінальних режимах допускаються втрати електроенергії до 15 %. Результати досліджень, проведених у метрополітенах різних міст, свідчать про те, що для максимального використання електроенергії рекуперації за дотримання графіка руху поїздів енергія міжпоїздного обміну становить 8–13 %, надлишкова – 5–1,5 %, а сама енергія рекуперації— 13–15 % загальних витрат на тягу поїздів

Вирішенням згаданих недоліків є накопичення рекуперативної енергії безпосередньо на борту транспортних засобів з її подальшим застосуванням під час прискорення. Практична доцільність накопичення та подальшої утилізації енергії підтверджена на різноманітних видах транспорту, серед яких вирізняються значним ступенем досконалості гіробуси швейцарської компанії «Ерлікон», що успішно експлуатувалися для пасажирських перевезень упродовж п'ятнадцятирічного періоду. Слід відзначити розробку експериментальних зразків метровагонів, оснащених інерційними накопичувачами рекуперованої енергії, які пройшли випробування у Нью-Йорку. Також були проведені експлуатаційні випробування автобусів моделі ЛАЗ-695, обладнаних маховиками, та міських автобусів Ikarus 556 з пневматичними акумуляторами у Ченстохові, Польща [5, 6].

Згідно з сучасною класифікацією, акумулювання енергії може здійснюватися в електричній, електрохімічній, пневматичній, механічній та тепловій формі. Вибір оптимального типу накопичувача енергії для застосування на міському електротранспорті (МЕТ) обумовлюється комплексом критеріїв, що включають як загальновідомі показники (питома енергоємність, яка визначається як кількість енергії на одиницю маси накопичувача; гранична потужність; глибина розряду; циклічна стійкість), так і додаткові чинники, такі як безпека для пасажирів та рівень технічної підготовленості експлуатуючих підприємств.

З огляду на вищезазначені фактори, використання теплових, надпровідних індуктивних накопичувачів, високотемпературних літій-хлорових електрохімічних акумуляторів та водневих електролізерів не є перспективним принаймні у коротко- та середньостроковій перспективі. Натомість, з позиції технологічної сумісності та наступності технічних рішень, доцільними є низькотемпературні електрохімічні акумулятори, інерційні накопичувачі енергії (маховики) та пневматичні акумулятори.

Аналіз характеристик енергоакумуляторів за показниками питомої енергоємності та питомої потужності (відповідно до рис. 3.1) демонструє очевидну перевагу механічних накопичувачів – маховиків – над електрохімічними акумуляторами та системами, що використовують стиснене повітря. Однак, з точки зору конструктивних особливостей рухомого складу МЕТ, найбільш прийнятними вважаються електрохімічні акумулятори. Це пов'язано з тим, що їх інтеграція потребує лише додаткового керованого інвертора для підтримання зарядної напруги батареї під час рекуперації та плавного підвищення напруги під час споживання накопиченої енергії. На відміну від цього, механічні та пневматичні системи накопичення енергії вимагають принципово відмінних конструктивних рішень ходових частин.

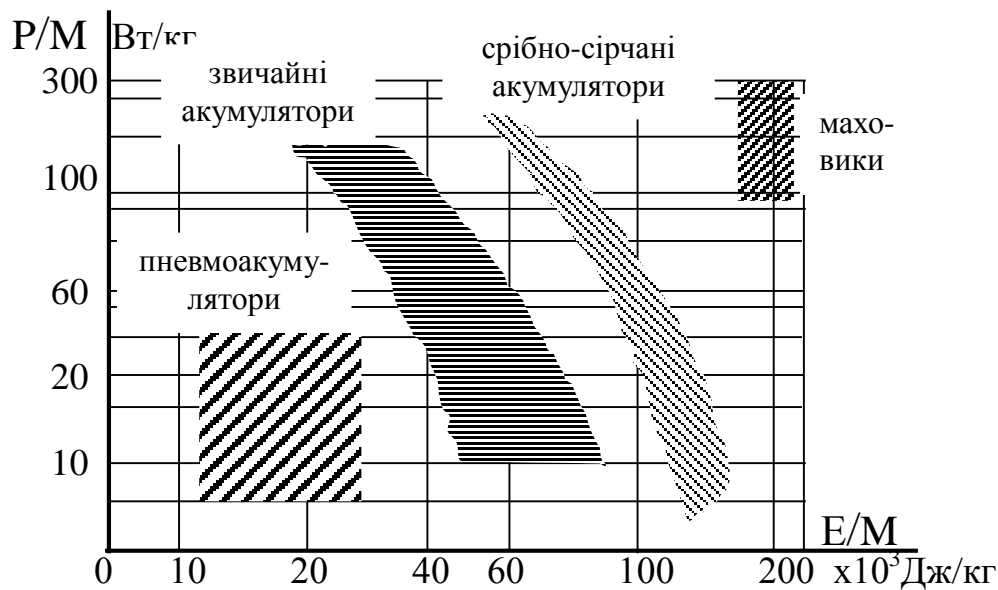


Рис. 3.1. Порівняння енергоаккумуляторів різних типів по питомій енергоемності E/M та питомій потужності P/M

За поточних технічних характеристик рухомого складу, обсяг корисної енергії, що рекуперується під час гальмування (з урахуванням подолання опору руху), коливається в діапазоні від 1,0 до 2,5 МДж. Це відбувається за пікової початкової потужності 200–450 кВт і тривалості рекуперації до 15 секунд. Шляхом ділення цієї рекуперованої енергії на показники питомої енергетичної ємності та питомої потужності можна розрахувати орієнтовну додаткову масу обладнання для різних видів енергоаккумуляторів. Так, для традиційних акумуляторних батарей, що використовуються в транспорті, ця додаткова маса може сягати до 3000 кг; для срібно-сірчанних акумуляторів – до 1500 кг; а для маховичних накопичувачів енергії – до 800 кг. Пневматичні системи накопичення енергії, зі свого боку, виявляються неспроможними забезпечити акумуляцію необхідного обсягу енергії, оскільки їхня маса буде порівнянною з масою самого рухомого складу.

Відтак, логічним є обґрунтування пропозиції інвертувати рекуперовану енергію безпосередньо до первинної електромережі. Це передбачає перетворення постійного струму, що надходить від контактної мережі під час рекуперації рухомої одиниці на секції, у трифазний змінний струм напругою

600 В на вторинній обмотці силового трансформатора тягової підстанції. Цей трансформатор таким чином функціонує як підвищувальний, передаючи енергію до мережі змінного струму напругою 6–10 кВ. Хоча ця концепція була вперше реалізована на тягових підстанціях залізниць, вона не набула широкого застосування через низьку надійність ртутних перетворювачів, які на той період були єдиними доступними керованими електронними пристроями.

З появою потужних напівпровідникових приладів, зокрема керованих тиристорів, завдання інвертування рекуперованої енергії в первинну електромережу трансформувалося з площини фундаментальних наукових проблем у сферу суто інженерних завдань. Її впровадження, зокрема в системах реверсивного електроприводу, вже продемонструвало значний економічний ефект.

Таким чином, ключовим є забезпечення того, щоб впровадження інвертування рекуперованої енергії в первинну електромережу на метрополітенах (МЕТ) відбувалося одночасно з оснащенням рухомого складу електронними перетворювачами, здатними здійснювати рекуперативне гальмування аж до повної зупинки. Наразі така інтеграція не реалізована повною мірою, насамперед, через брак адекватного фінансування науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, а по-друге, через нещодавню відсутність ефективних технічних рішень для компенсації стрибків напруги в контактних мережах під час рекуперативного режиму. Відповідно, є потреба в розробці ресурсощадних проектів, спрямованих на оптимізацію конструкції транспортних засобів та систем електропостачання, а також на створення належних експлуатаційних умов.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Загальні питання з охорони праці

Відповідно до визначеного завдання бакалаврської роботи, передбачається розробка вимог до лабораторних занять, присвячених дослідженню процесів трансформації енергії в транспортних системах. З огляду на використання комп'ютерної техніки як під час створення, так і під час безпосереднього проведення цих робіт, особлива увага приділяється забезпеченню безпечних умов праці для користувачів як на етапі проєктування, так і в процесі експлуатації даного проєкту.

Охорона праці визначається як комплексна система заходів правового, соціально-економічного, організаційно-технічного, санітарно-гігієнічного та лікувально-профілактичного характеру, ціль якої полягає у підтриманні здоров'я та працездатності індивідуума під час його професійної діяльності. На національному рівні її забезпечення регламентується відповідними законодавчими та нормативними актами [18-20].

Основною метою охорони праці є мінімізація ризиків травматизму та професійних захворювань серед працівників із паралельним створенням оптимальних умов праці для досягнення максимальної продуктивності. Це також включає проведення ґрунтовного аналізу робочого середовища, виробничих процесів та обладнання з метою ідентифікації потенційних аварійних ситуацій, виникнення небезпечних чинників та виділення шкідливих субстанцій. За результатами такого аналізу виявляються потенційно небезпечні зони виробництва, прогноуються можливі надзвичайні події та формулюються превентивні заходи або стратегії з мінімізації їхніх наслідків.

На території України чинними є державні санітарні норми та правила, що регламентують умови праці з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин (ДСанПіН 3.3.2-007-98 [18]). Згідно з ними, мінімальна площа, відведена для одного робочого місця, має складати 6

м², а об'єм приміщення – не менше 20 м³. Відстань між послідовно розташованими робочими столами повинна бути не менше 2,5 м, а між рядами – 1,2 м. Додатково, стіни приміщень повинні забезпечувати коефіцієнт відбиття у діапазоні 0,5-0,6.

Діяльність, що передбачає взаємодію з комп'ютерною технікою, зокрема на спеціалізованих стендах, супроводжується підвищеним когнітивним навантаженням, значним нервово-емоційним стресом, інтенсивним зоровим напруженням та суттєвим навантаженням на м'язово-скелетний апарат верхніх кінцівок.

В процесі експлуатації комп'ютеризованих стендів має місце інтенсивне зорове навантаження, що вимагає відповідності певним нормативам освітлення. Зокрема, мінімальний розмір об'єкта розрізнення повинен становити 0,3-0,5 мм, яскравість символу (на тлі) – в діапазоні 35-120 кд/м², а коефіцієнт контрастності – бути середнім (від 3:1 до 1,5:1) відповідно до НПАОП 0.00-1.28-10 [9]. Рекомендована тривалість перерви для оператора становить 10 хвилин на кожен годину роботи. За показниками важкості та напруженості праці, умови повинні класифікуватися як друга категорія з низьким рівнем ризику, що відповідає допустимим нормам згідно з НПАОП 0.00-1.28-10 [15].

Відповідно до прийнятої систематизації елементів умов трудової діяльності, небезпечні і шкідливі виробничі чинники (НШВП), що визначаються згідно з ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ та потенційно впливають на працівника, поділяються на фізичні, хімічні та психофізіологічні категорії.

Під час експлуатації комп'ютерного обладнання на спеціалізованих стендах на оператора впливає сукупність потенційно несприятливих чинників, класифікація яких також регламентується положеннями ДСанПіН [10]. Параметричні значення цих чинників підлягають нормативному регулюванню згідно з чинними документами. перелік зазначених небезпечних і шкідливих чинників, а також відповідні нормативи для приміщення, де заплановано проведення лабораторних робіт.

Найбільш вагомими для лабораторії є рівень електромагнітного іонізуючого випромінювання та електростатичного поля, а також електробезпека.

Допустимі параметри електромагнітного іонізуючого випромінювання та електростатичного поля

Вплив електромагнітних полів на організм людини класифікується за їхньою інтенсивністю, що проявляється різноманітними негативними ефектами:

- Поля високої інтенсивності** спричиняють термічне ураження біологічних тканин та несприятливо впливають на функціонування органів зору.

- Поля помірної інтенсивності** можуть провокувати дисфункції центральної нервової та серцево-судинної систем, а також спричинити дезорганізацію біохімічних та фізіологічних процесів на клітинному та тканинному рівнях.

- Поля низької інтенсивності** асоціюються з неспецифічними симптомами, такими як підвищена втомлюваність, цефалгії та посилене випадіння волосяного покриву.

Максимально допустимий рівень напруженості електростатичного поля встановлено на рівні 15 кВ/м. Цей показник відповідає нормативним вимогам НПАОП 0.00-1.28-10 [19] та не перевершує встановлений граничний показник $E \leq 20$ кВ/м.

З метою мінімізації негативного впливу електромагнітних полів, передбачається комплекс захисних заходів, що включає: раціональне обмеження тривалості перебування у зоні дії джерела випромінювання, збільшення дистанції до джерела (зокрема, рекомендована відстань становить 60-80 см від екрана), а також застосування екранування робочих місць або джерел електромагнітного випромінювання.

Електробезпека

Електропостачання обчислювальної техніки здійснюється від однофазної трипровідної електричної мережі (що включає фазний, робочий нульовий та захисний нульовий провідники) з номінальною напругою 220 В, частотою 50 Гц та загальною потужністю 2 кВт.

Зазначена лабораторія, згідно з критеріями електробезпеки, класифікується як приміщення підвищеної небезпеки. Це зумовлено потенційною можливістю одночасного контакту персоналу із заземленими металевими конструкціями споруд та струмопровідними металевими корпусами електрообладнання, як це визначено в ПУЕ-2011 [23].

У приміщенні лабораторії встановлено систему повторного заземлення, реалізовану заземлювальним провідником, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.-5-38:2008* та підключена до заземленої нейтралі електроустановки.

Електробезпека експлуатованих електричних приладів забезпечується шляхом застосування комплексу конструктивних, схмотехнічних та експлуатаційних заходів. Усі вимірювальні пристрої оснащені захисними корпусами. Доступ до внутрішніх елементів корпусу дозволяється виключно після повного відключення приладу від мережі живлення. Згідно з ПУЕ-2011 [23], ступінь захисту оболонок та корпусів апаратури відповідає стандарту IP44, що гарантує захист від проникнення твердих сторонніх тіл розміром понад 1 мм та від бризок води.

Схмотехнічні та конструктивні рішення спрямовані на забезпечення безпеки персоналу від небезпечного дотику до металевих та струмоведучих частин електричних апаратів.

Враховуючи, що номінальна напруга в мережі знаходиться в діапазоні від 42 В до 1000 В, для ефективного захисту від ураження електричним струмом застосовується система занулення, згідно з ДСТУ Б В.2.-5-38:2008*.

З огляду на вищезазначене, для персоналу прийнято I клас захисту від ураження електричним струмом. Це обґрунтовується наявністю у комп'ютерного обладнання відповідної ізоляції та заземлювальних елементів,

які гарантують безпеку контакту з металевими неструмопровідними частинами у випадку пошкодження ізоляції та виникнення на них електричного потенціалу. До основних організаційно-технічних заходів забезпечення електробезпеки належать: захисне заземлення; занулення; вирівнювання потенціалів; використання низьких напруг; електричне розділення мереж (за допомогою розділових трансформаторів); захисне відключення; різні види ізоляції струмопровідних частин (робоча, додаткова, посилена, подвійна); компенсація струмів замикання на землю; огорожувальні пристрої; електрична попереджувальна сигналізація; блокування. Допоміжними технічними засобами, що застосовуються при обслуговуванні та експлуатації електроустановок, є інформаційні плакати та знаки безпеки/небезпеки; засоби індивідуального захисту; запобіжні пристрої; а також дерев'яні решітки та гумові килимки. Отже, комплекс розглянутих у розділі охорони праці питань та запропонованих заходів забезпечить належні та безпечні умови праці в лабораторії під час досліджень, пов'язаних з перетворенням енергії.

ВИСНОВКИ

Дане дослідження присвячено аналізу процесів трансформації енергії у транспортній галузі, з акцентом на останні досягнення науково-технічного прогресу у сфері матеріально-технічного забезпечення, використання альтернативних джерел енергії та суміжних аспектів.

Ключовими результатами роботи є:

- комплексний аналіз фундаментальних принципів перетворення енергії на транспорті, що охоплює енергетичні трансформації у механічних та теплових системах, показники ефективності енергоперетворення, особливості енергетичних конверторів та накопичувачів, а також електромашинних перетворювачів енергії;
- обґрунтування заходів з безпеки праці в умовах лабораторії.

Отримані дані, представлені у цій бакалаврській роботі, демонструють значний потенціал для оптимізації споживання енергії на підприємствах транспортного сектору.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України "Про енергозбереження" // Постанова Верховної Ради України №75/94-ВР від 01.07.1994.
2. Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами, та внесення змін до деяких законів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електрзарядної інфраструктури та електричних транспортних засобів [Електронний ресурс]: Закон України від 24.02.2023 №2956-IX: станом на 01 серп.2025р. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2956-20#Text>
3. Андрусенко, С. І., Будниченко, В. Б., Подпіснєв, В. С. (2022), "Методика оцінки споживання енергії електробусом та параметрів тягової акумуляторної батареї в умовах експлуатації", Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, № 22, с. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.8>
4. Андрусенко, С. І., Будниченко, В. Б., Подпіснєв, В. С. (2021), "Оптимізація параметрів тягової акумуляторної батареї у тролейбусах із частковим автономним ходом", Науково-виробничий журнал «Автошляховик України» (Автомобільний транспорт), № 3 (267), с. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2021-3-267-15-21>
5. Дембіцький, В., Андрусенко, С., Будниченко, І., (2023), "Оцінка показників долі рекуперації енергії тролейбусами в умовах міського руху", Сучасні технології в машинобудування на транспорті. Луцький національний технічний університет, том 2, № 21. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i21.1202>
6. Сорока, К. О. (2022), Тягові розрахунки на основі аналізу процесів перетворення енергії : монографія / К.О.Сорока; Харк. Нац. Ун-т міськ. Госп-ва ім. О.М. Бекетова.-Харків :ХНУМГ ім О.М.Бекетова, 243 с.
7. Кульбашна, Н., Лукашова, Н., Далека, В., Скуріхін, В.. (2025), "Шляхи підвищення енергоефективності електробусів за рахунок сучасних фотоелектричних технологій", Комунальне господарство міст : наук.-техн. зб.

Харків : ХНУГХ ім. О. М. Бекетова, том 1. № 189, С. 52–60.

DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-52-60>

8. Kulbashna ,N., Daleka, V., Lukashova, N., Furtat ,S, (2025), "Energy Aspects of Forming Electric Bus Charging Schedules", *Lighting Engineering & Power Engineering*, Vol. 64, No. 2, pp. 153–162. DOI: <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2025.64.2.03>
9. Далека, В., Бомбандьоров, Ю., Метешкін, К., Андрусевич, А., & Чумаченко, І. (2026). ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЄМНОСТІ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ В ПРОЄКТАХ І ПРОГРАМАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ УКРАЇНИ. *Автоматизовані системи управління та прилади автоматики*, (189), 259–266. <https://doi.org/10.30837/0135-1710.2026.189.259>
10. ДСТУ 3886-99. Енергозбереження. Системи електроприводу. Метод аналізу та вибору. Чинний від 01.07.2000. К.: Держстандарт України, 2000. – 54 с.
11. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії / Кудря С.О. – Підручник. – Київ: Національний технічний університет України («КПІ»),. 2012. – 495 с.
12. Комаха В.П. Маховичне джерело енергії в стаціонарних енергетичних установках.- *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 1 (91) 2015.- С.115-117.
13. В. Szabados. Peak Power Bi-directional Transfer From High Speed Flywheel to Electrical Regulated Bus Voltage System: A Practical Proposal for Vehicular Technology. // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – Vol. – 13. - №1. – March 1998. – pp. 34-41
14. Електропостачання електричного транспорту: навч. посіб./ В.Х. Далека, В.К. Нем, В.І. Скуріхін; Харк. нац. академія міськ. госп-ва. Х.: ХНАМГ, 2012.- 168 с.
15. Далека В.Х., Будниченко В.Б., Карпушин Е.І., Коваленко В.І. Технічна експлуатація міського електричного транспорту: навч. посібник / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова.-Х.: ХНУМГ, 2014.- 236 с.

16. Рухомий склад міського електричного транспорту. Механічна частина : навч. посібник / В.Х. Далека, М.В. Хворост, В.І. Скуріхін, Д.І. Скуріхін. Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова, 2018. – 388 с.
17. Дудко В. Б., Луценко М.П. Практичні аспекти ресурсозбереження на комунальному підприємстві «Вінницька транспортна компанія». Проблеми ресурсозбереження в промисловості та на транспорті : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 23–25 жовт. 2024 р. / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова [], 2024. – С. 10-14.
18. ДСанПіН 3.3.2-007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин.- К., 1998.
19. НПАОП 0.00-1.28-10 Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин.-Київ: 2010.
20. ДСанПіН «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», МОЗУ Наказ від 08.04.2014 № 248.
21. ДБН В.2.5-67*. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Чинний з 01 січня 2013 року.
22. ДБН В 2.5-67:2013 Державні будівельні норми. Опалення, вентиляція та кондиціонування. - Діє з 1.01.2014.
23. ПУЕ-2011. Правила улаштування електроустановок. К., 2011. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. - РОЗДІЛ 1. Загальні правила. Глава 1.7 Заземлення і захисні заходи електробезпеки.

ДОДАТКИ