

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Електротехніка та енергоефективність

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістрський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему Підвищення ефективності використання електричної енергії  
для живлення тягових підстанцій

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1419  
спеціальності 141 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації \_\_\_\_\_

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми 141.00.11 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

(назва освітньої програми)

Г.Д. Муравйова

(ініціали та прізвище)

Керівник доц., доц., к.т.н. Небеснюк О.Ю.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент Директор ГОВ "Фелкс" А.В. Колос

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя  
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут \_\_\_\_\_  
Кафедра електротехніки та енергоефективності  
Рівень вищої освіти другий (магістрський) рівень  
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)  
Освітня програма 141.00.11 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ЗМУ  
« 09 » 12 2020 року

**З А В Д А Н Н Я**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Муравйова Ганна Данилівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Підвищення ефективності використання електричної енергії для живлення тягових підстанцій

керівник роботи Небеснюк Оксана Юріївна, к.т.н., доц.

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

затверджені наказом ЗНУ від « 14 » вересня 20 року № 1306-с

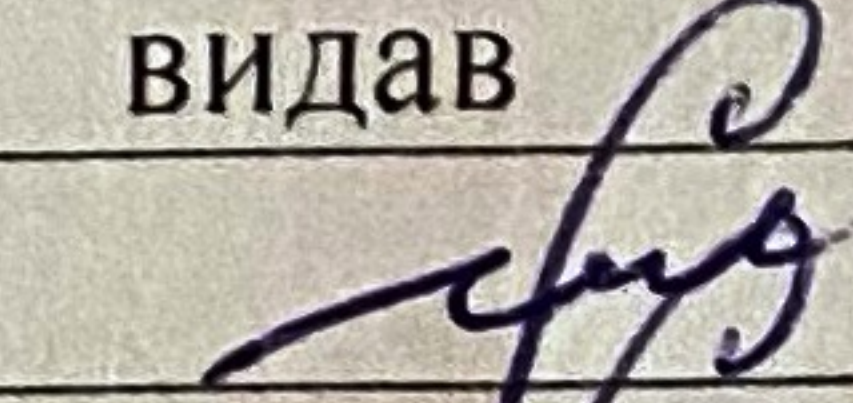
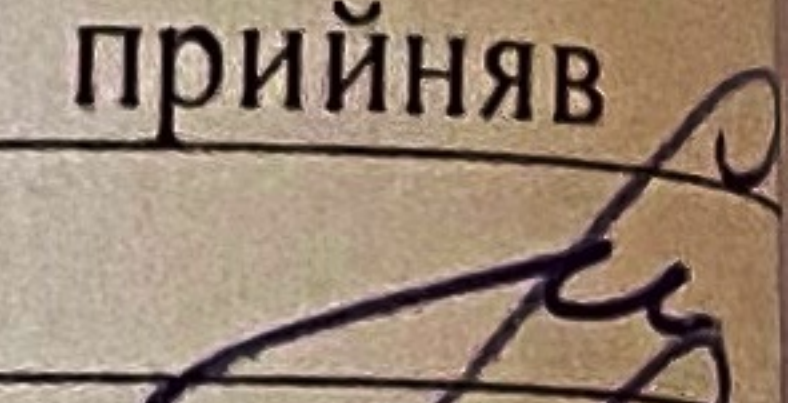
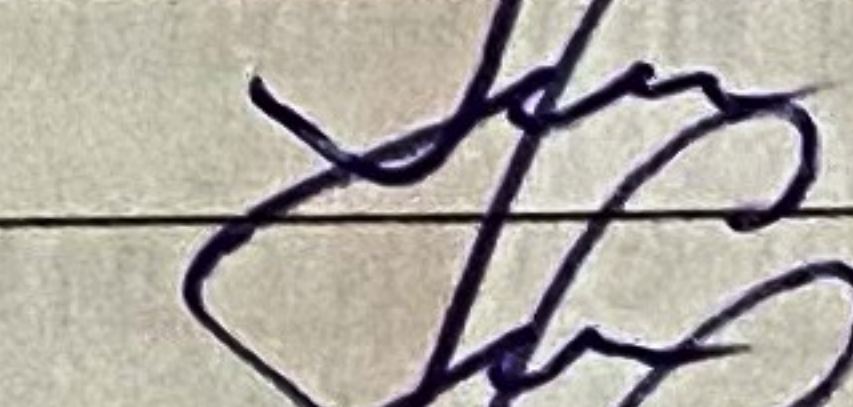
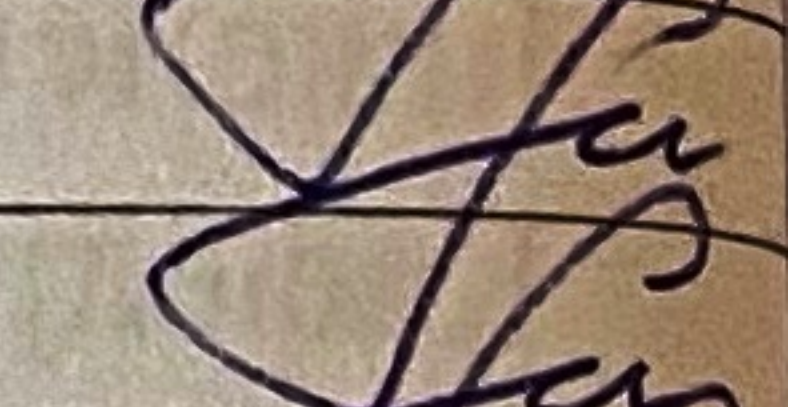
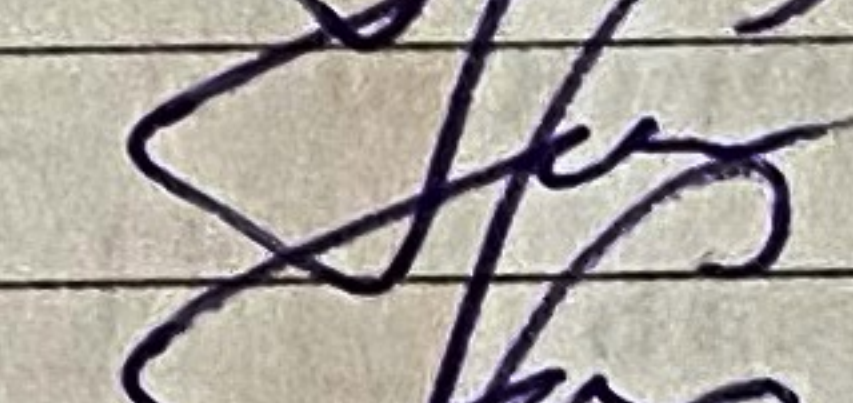
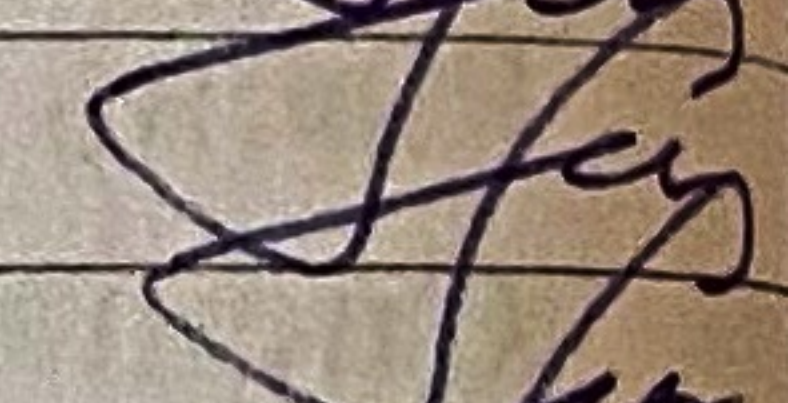
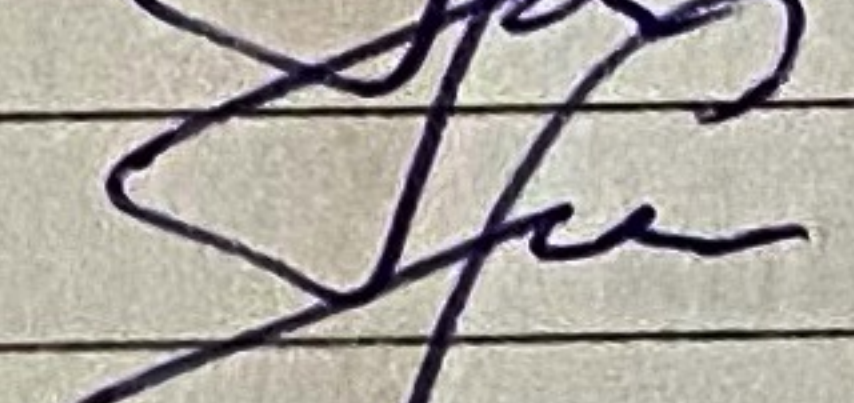
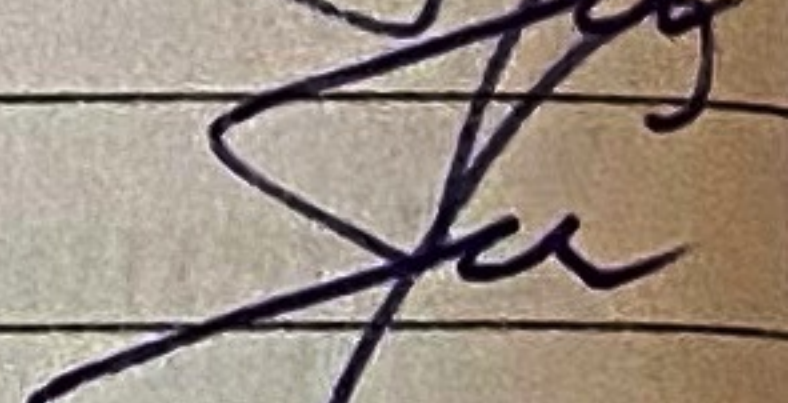
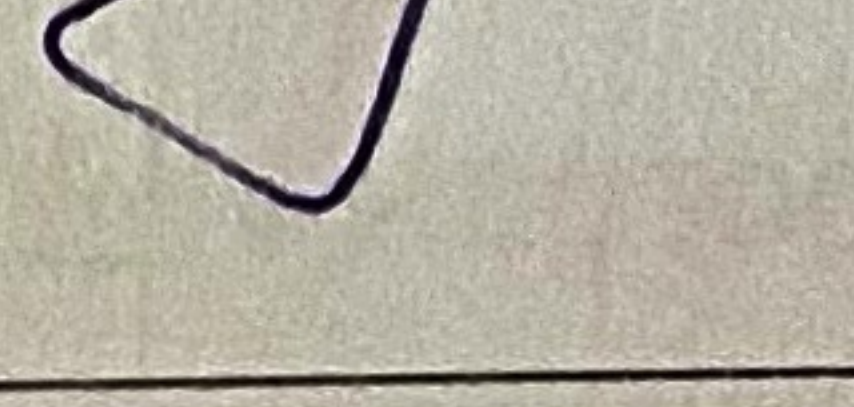
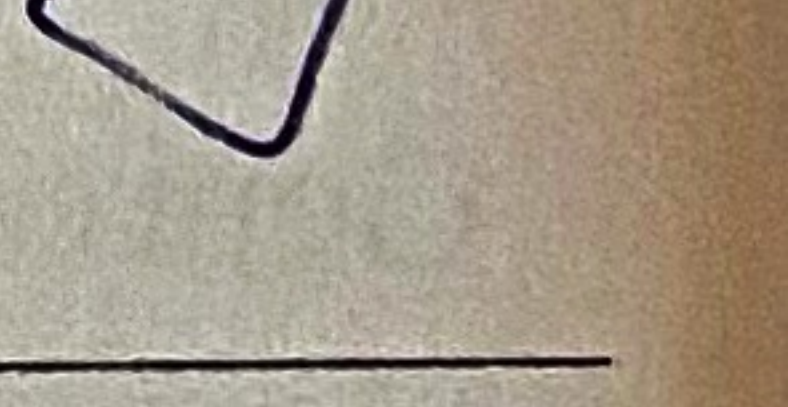
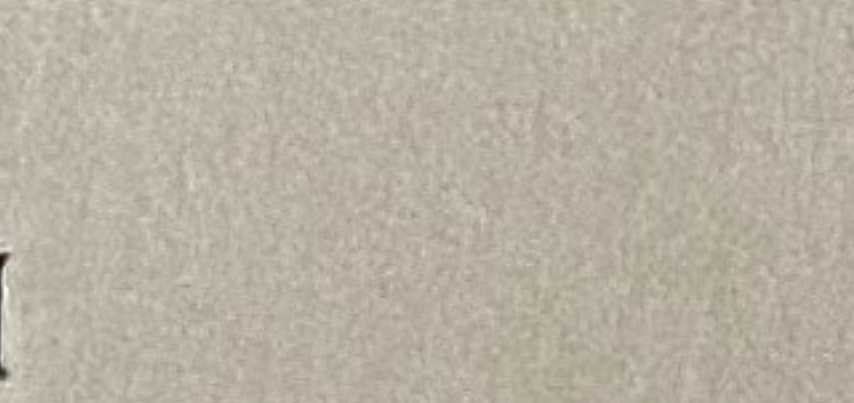

2 Строк подання студентом роботи 01 грудня 2020 р.

3 Вихідні дані до роботи Існуючі системи тягового енергопостачання та структурно-конструктивні особливості тягових підстанцій, потужність накопичувачів енергії, тягова підстанція 25 кВ

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Системи тягового енергопостачання та структурно-конструктивні особливості тягових підстанцій, аналіз можливостей покращення енергетичних показників електричної тяги, застосування накопичувачів енергії у системі енергопостачання, економічне обґрунтування використання накопичувачів енергії

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Взаємодія тягових підстанцій та ЕРС, структурна схема опорної ТП 25 кВ, графік споживання електричної енергії поїздом, енергоустановки з накопичувачами енергії, струми тягової підстанції з накопичувачем енергії

## 6 Консультанти розділів роботи

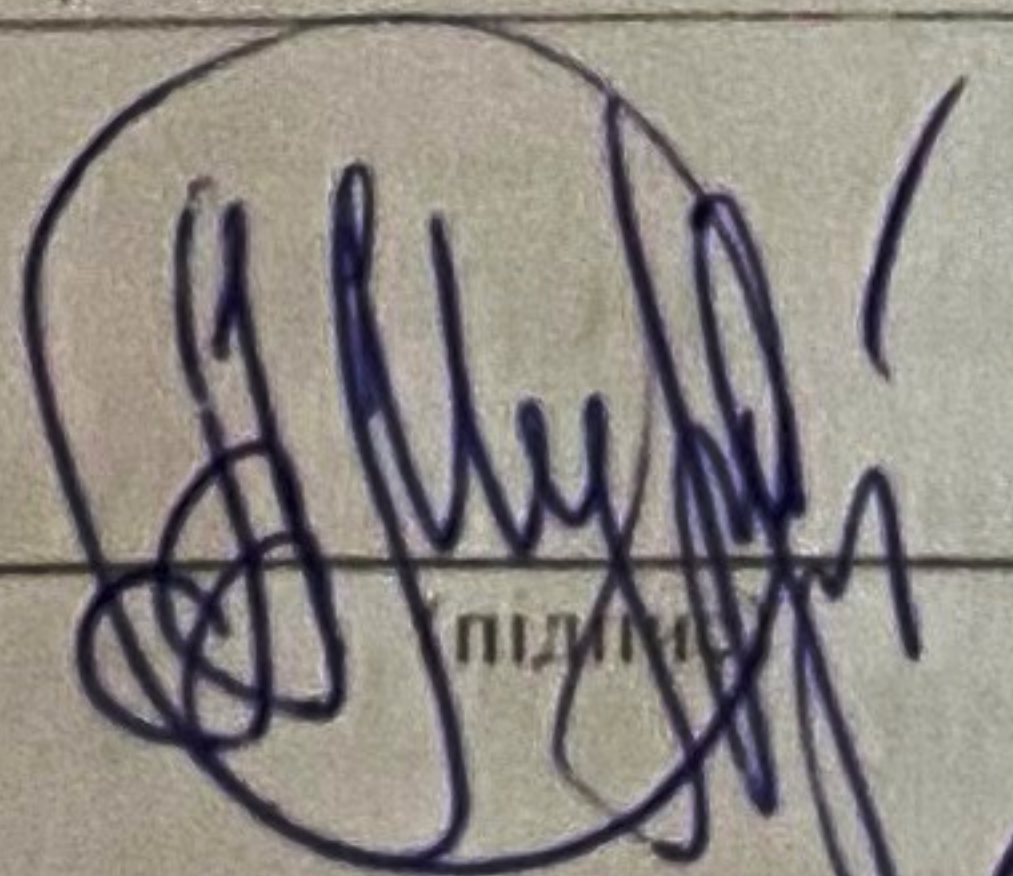
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Небеснюк О.Ю., доцент		
Розділ 2	Небеснюк О.Ю., доцент		
Розділ 3	Небеснюк О.Ю., доцент		
Розділ 4	Небеснюк О.Ю., доцент		
Розділ 5	Небеснюк О.Ю., доцент		
Розділ 6	Небеснюк О.Ю., доцент		

7 Дата видачі завдання 02.09.2020

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

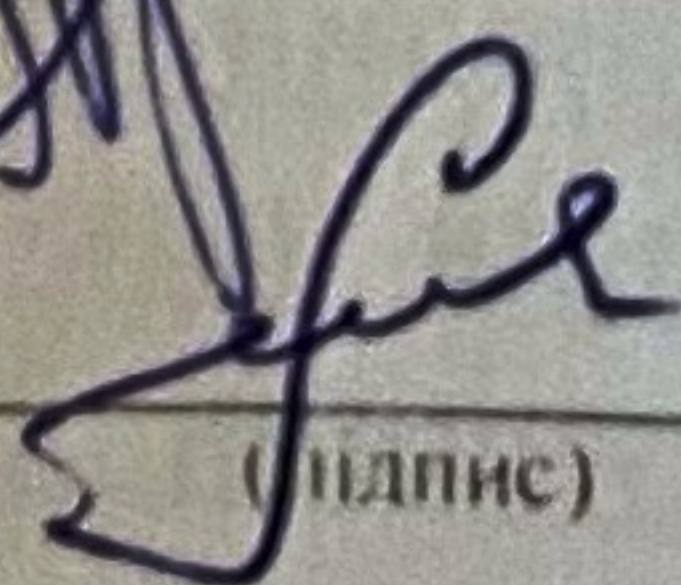
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Системи тягового енергопостачання та структурно-конструктивні особливості тягових підстанцій	18.09.2020	
2	Аналіз можливостей покращення енергетичних показників електричної тяги	10.10.2020	
3	Аналіз існуючих накопичувачів енергії та перспективи їх використання в системі енергопостачання	10.11.2020	
4	Застосування накопичувачів енергії у системі енергопостачання	15.11.2020	
5	Економічне обґрунтування використання накопичувачів енергії	30.11.2020	
6	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	05.12.2020	

Студент

  
(підпис)

Г.Д. Муравйова  
(ініціали та прізвище)

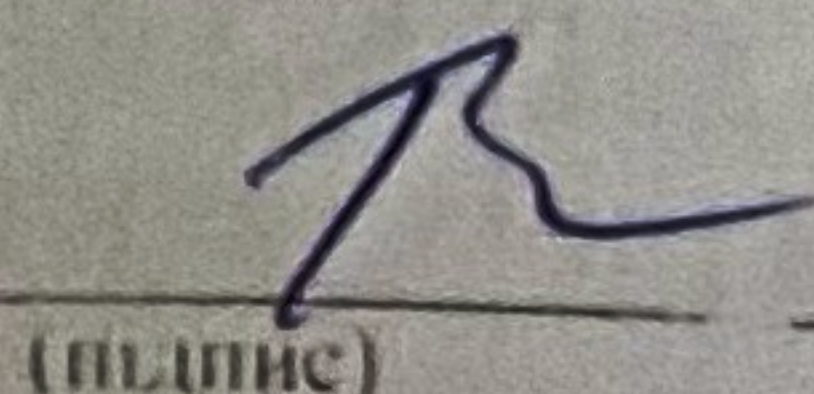
Керівник роботи

  
(підпис)

О.Ю. Небеснюк  
(ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер

  
(підпис)

С.В. Башлій  
(ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Муравйова Г.Д. Підвищення ефективності використання електричної енергії для живлення тягових підстанцій.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник О.Ю. Небеснюк. Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут, 2020.

Магістерська робота містить 121 сторінок, 29 рисунків, 4 таблиць, 19 літературних джерел.

Анотація. У роботі проведено аналіз наявних систем тягового енергопостачання та структурно-конструктивні особливості тягових підстанцій. Представлені схеми живлення електрорухомого складу та зв'язок тягових підстанцій з зовнішніми джерелами електричної енергії. Виконано аналіз можливостей покращення енергетичних показників електричної тяги. Проведено аналіз існуючих у світі накопичувачів енергії та перспективи їх використання в системі енергопостачання. Розглянуті енергоакумулятори, які використовують джерела газу, електрохімічні, індуктивні, ємнісні та маховикові накопичувачі енергії. Розглянуто можливість застосування накопичувачів енергії у системі енергопостачання залізниць.

Ключові слова: тягові підстанції, електрорухомий склад, накопичувачі енергії, якість електричної енергії.

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

- е.р.с. – електрорухомий склад;
- ТП – тягова підстанція;
- ЛЕП – лінії електропередач;
- ВЛ – високовольтна лінія;
- ТЕД – тяговий електродвигун;
- ВУ – високовольтна установка;
- ЕРС – електрорушійна сила;
- РП – розподільний пристрій;
- ВН – висока напруга;
- НН – низька напруга;
- ФОП – фонд оплати праці;
- ЗІЗ – засоби індивідуального захисту.

# ЗМІСТ

Вступ .....	
1 Системи тягового енергопостачання та структурно-конструктивні особливості тягових підстанцій.....	
2 Аналіз можливостей покращення енергетичних показників електричної тяги .....	
3 Аналіз існуючих накопичувачів енергії та перспективи їх використання в системі енергопостачання .....	
3.1 Накопичувачі, що використовують джерела газу .....	
3.2 Електрохімічні накопичувачі енергії .....	
3.3 Індуктивні накопичувачі енергії.....	
3.4 Ємнісні накопичувачі енергії.....	
3.5 Маховикові накопичувачі енергії.....	
4 Застосування накопичувачів енергії у системі енергопостачання .....	
5 Економічне обґрунтування використання накопичувачів енергії.....	
6 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях .....	
6.1 Охорона праці, об'єкти підвищеної небезпеки .....	
6.2 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів .....	
6.3 Організаційні та технічні заходи по забезпеченню захисту працівників.....	
6.4 Правила безпечного виконання робіт при обслуговуванні тягових підстанцій.....	
6.5 Дії персоналу у надзвичайних ситуаціях.....	
Висновки.....	
Список літератури .....	
Додатки .....	

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Енергозбереження, як діяльність спрямована на раціональне використання енергії і природних енергетичних ресурсів. Енергозбереження є важливою ланкою у ланцюзі господарської діяльності людини. Навіть, в цивілізованих країнах, де добувають вуглеводні, переймаються проблемами енергозбереження та розвитку альтернативних джерел енергії. Для України енергетика має особливе значення, оскільки це питання пов'язане з енергонезалежністю країни.

Найбільша складова потенціалу енергозбереження на електричному транспорті припадає на гальмівні втрати. Інакше кажучи, мова йде про запасену кінетичну енергію, яку має транспортна одиниця перед початком гальмування і яка у переважній своїй більшості в процесі гальмування витрачається на нагрівання та втрачається у механічних гальмах. При цьому електрична енергія перетворюється в теплову, розсіюється у повітрі, і при цьому відбувається стирання гальмівних колодок. Зрозуміло, що такий підхід є нераціональним тому науковцями і інженерами велися відповідні пошуки розв'язання даної проблеми.

Нераціональність такого перетворення електроенергії була очевидна, мабуть, з перших кроків застосування електроприводу на колісному наземному транспорті, але також були очевидні технічні труднощі в реалізації ідеї використання перетвореної з кінетичної енергії рухомої одиниці електричної енергії для повторного споживання – так званої енергії рекуперації [1 - 3].

Ці труднощі стосувалися як забезпечення умов переходу тягових двигунів у генераторний режим зі збереженням належного рівня електропротирувальної сили при зміні швидкості обертання якорів від будь-якого початкового значення до нуля, так і забезпечення умов споживання рекуперованої енергії.

До появи на транспорті силової електроніки, тобто на рухомому складі з реостатно – контакторним регулюванням, вирішення проблеми забезпечення генераторного режиму тягових двигунів з рівнем електрорушійної сили, більшим за рівень напруги у контактній мережі та при підтриманні сталого моменту на якорі, по всьому діапазону швидкостей руху було принципово неможливо.

Застосування двигунів з переважаючою намагнічувальною силою паралельних обмоток на міському електротранспорті дозволяли реалізувати рекуперативне гальмування до швидкості не менше 24 км/год., а на електровозах постійного струму – до 15 км/год і практично ніяких зрушень у енергоспоживанні не зробило, оскільки схемою керування передбачалося рекуперативне гальмування на позиціях розбігу, що спричиняє певні незручності для машиністів і водіїв.

Крім того, навіть і невеликий відсоток можливої економії енергії не міг бути реалізований, оскільки імовірність реалізації потужності рекуперації та одночасного існування не меншої потужності споживання на одній секції або фідерній зоні є малою. Ось чому, незважаючи на надзвичайно привабливі результати теоретичного обчислення можливої економії енергії при застосуванні на рухомому складі електричного транспорту електронних перетворювачів, що передбачають рекуперацію до повної зупинки та інших накопичувачів проблема використання енергії рекуперації досі залишається не вирішеною. На сьогоднішній день також не вирішено питання доцільності розміщення накопичувачів електроенергії: безпосередньо на транспортному засобі або в системі тягового електропостачання [4]. В більшості досліджень не приділяється значної уваги на втрати в елементах силового приводу і системи електропостачання при оберненому перетворенні механічної енергії в електричну. Наприклад, тільки в контактній мережі та тягових підстанціях в номінальних режимах допускаються втрати електроенергії до 15 %. Дослідження, які були виконані на метрополітенах різних міст, показали, що при забезпеченні графіків руху поїздів для максимального споживання електроенергії рекуперації, енергія міжпоїздного обміну складає 8 - 13 %, надлишкова – до 5 % при енергії рекуперації 13 - 15 % загальних витрат на тягу поїздів. Всього ж, за даними фахівців, на електротранспорті з частими пусками - гальмуванням енергія рекуперації може досягати 40 %.

Вільним від вказаних недоліків є акумулювання енергії рекуперації безпосередньо на рухомих одиницях з наступним її використанням при пусках. Можливість накопичення енергії з наступним її використанням практично



доведена на багатьох видах транспорту, з яких найбільшою досконалістю відрізняються гіробуси швейцарської фірми “Ерлікон”, які здійснювали перевезення пасажирів протягом 15 років. До експериментальних зразків доведена розробка вагонів метрополітену з інерційним енергоакумулятором рекуперованої енергії, які пройшли випробування у Нью-Йорку, проведені експлуатаційні випробування автобуси ЛАЗ-695 з маховиком, міських автобусів Ikarus 556 з пневмоакумулятором у Ченстохові (Польща). Згідно з існуючою класифікацією, акумуляування енергії може бути у електричній, електрохімічній, пневматичній, механічній та тепловій формі.

Вибір тої чи іншої форми для застосування на МЕТ визначається крім таких очевидних критеріїв, як питома енергоємність (кількість енергії на одиницю маси енергоакумулятора), максимальна потужність, глибина розряду, максимальна кількість циклів “заряд-розряд”, також прийнятністю енергоакумулятора з точки зору безпеки для пасажирів та технічним рівнем експлуатаційних підприємств. З цих позицій використання теплових, надпровідних індуктивних накопичувачів, літій-хлорових електрохімічних високотемпературних акумуляторів, водневих електролізерів принаймні на найближчі десятиліття не матимуть перспективи. Прийнятними з точки зору наступництва техніки є очевидно електрохімічні низькотемпературні акумулятори, інерційні маховики та пневмоакумулятори. Зі співставлення характеристик енергоакумуляторів за показниками питомої енергоємності та питомої потужності однозначно впливає перевага механічних акумуляторів – маховиків над електрохімічними акумуляторами та енергоакумуляуючими системами, що використовують стиснене повітря. Найбільш придатним з точки зору конструкції рухомого складу міського електротранспорту є електрохімічні акумулятори, бо їх застосування потребує лише додаткового керованого інвертора для підтримання напруги заряджання батареї під час рекуперації та поступового підняття напруги під час споживання накопиченої енергії, у той час як механічні та пневматичні енергоакумулятори вимагають принципово відмінних конструктивних рішень ходових частин.

При існуючих зараз параметрах рухомого складу корисна енергія одного рекуперативного гальмування з урахуванням роботи з подолання опору рухові знаходиться в межах  $(1,0 - 2,5) \cdot 10^6$  Дж при максимальній початковій потужності у 200 – 450 кВт і тривалості рекуперації до 15 с. Розділивши корисну енергію рекуперації на показник питомої енергоемності та на показник питомої потужності, отримуємо приблизні значення маси додаткового устаткування для різних видів енергоакумуляторів. Так, для звичайних акумуляторів, що використовуються зараз на транспорті, додаткова маса сягає до 3000 кг, для срібно-сірчаних – до 1500 кг, для інерційних маховиків – до 800 кг. Пневматичні акумулятори взагалі неспроможні забезпечити накопичення потрібного обсягу енергії, бо їх маса повинна бути співмірна з масою самого рухомого складу.

З цього логічно випливає пропозиція інвертувати енергію рекуперації до первинної мережі електропостачання, тобто перетворювати енергію постійного струму, що надходить від контактної мережі при рекуперації рухомої одиниці на секції, у енергію трифазного змінного струму напругою 600 В на вторинній обмотці силового трансформатора тягової підстанції, який стає таким чином підвищувальним та передає енергію до мережі змінного струму 6 - 10 кВ. Ця ідея була вперше реалізована на тягових підстанціях залізниць, але внаслідок малої надійності ртутних перетворювачів, які на той час були єдиними керованими електронними приладами, широкого розповсюдження не знайшла.

З появою силових напівпровідникових приладів, а особливо керованих тиристорів, інвертування енергії рекуперації у первинну електромережу перейшло з розряду наукових проблем до розряду суто інженерних задач, зокрема на реверсивному електроприводі, де її впровадження дало значний економічний ефект.

При наявності на районі живлення деякої кількості одиниць, з яких певна частина рекуперує, різниця потенціалів між позитивними та негативними шинами розподільчого пристрою постійного струму може стати більша за номінальну напругу на виході випрямляча, який внаслідок цього закривається, а інвертор – відкривається. Робота секції при цьому моделюється паралельними, за кількістю

рухомих одиниць, ланцюгами з резисторами, що уособлюють опір силових кіл рухомих одиниць і опір контактної – кабельної мережі від струмоприймачів до шин тягової підстанції, та джерелами електропротиривної сили, що імітують тягові двигуни у тяговому  $E_{p.o.} < U_{k.m.}$  та генераторному  $E_{p.o.} > U_{k.m.}$  режимах.

*Метою роботи є аналіз можливості підвищення ефективності використання електричної енергії для живлення тягових підстанцій.*

*Задачі дослідження:*

- 1) Провести аналіз особливостей тягових підстанцій та можливостей покращення енергетичних показників електричної тяги.
- 2) Проаналізувати спектр існуючих накопичувачів енергії та перспективи їх використання в системі енергопостачання.
- 3) Дослідити можливість застосування накопичувачів енергії у системі енергопостачання.

*Наукова новизна.* Досліджено енергоефективний спосіб підвищення енергоефективності системи енергопостачання залізниць України.

*Практична значимість.* Запропоновано ефективні варіанти застосування накопичувачів в системі енергопостачання залізниць.

# 1 СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ТА СТРУКТУРНО-КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

Історично склалося так, що існує два принципових підходи до передачі електроенергії – використання змінного або постійного струму. Встановлено, що для невеликих відстаней набагато ефективніше використовувати змінний струм. Але при передачі електроенергії на відстані понад 300 км практичність використання змінного струму вже не так очевидна. Пов'язано це в першу чергу з хвильовими характеристиками переданої електромагнітної хвилі. Для частоти 50 Гц довжина хвилі становить приблизно 6000 км. Виявляється, що в залежності від протяжності ліній електропередач (ЛЕП) існують фізичні обмеження для передачі потужності. Максимум потужності можна передати при довжинах ЛЕП близько 3000 км, що становить половину довжини переданої хвилі. До слова, цей же обсяг потужності передають по ЛЕП протяжністю в 10 разів менше. За інших розмірах ліній обсяг потужності може досягати всього лише половини від даного значення. У 1968 році в СРСР був здійснений експеримент з передачі потужності на відстань 2858 км. Була зібрана штучно схема передачі, що включала в себе ділянки Волгоград-Москва-Куйбишев (нині Самара) -Челябінськ-Свердловськ (нині Єкатеринбург) на напрузі 500 кВ. Дослідним шляхом було підтверджено теоретичні дослідження довгих ліній.

Одними з довгих можна виділити прокладену в Китаї ЛЕП в 2200 км від східній провінції Хамі до міста Чженчжоу (столиця провінції Хенань). Також не варто забувати про напругу ліній. Згідно зі законом Джоуля-Ленца, втрати електричної енергії залежать від значення електричного струму в проводі та від матеріалу, з якого він виготовлений. Потужність, що передається по лініях електропередачі, є твір струму на напругу. Чим вище напруга, тим менше струм в проводі і тим самим менше рівень втрат електроенергії при передачі. Звідси наслідок: якщо ми хочемо передавати електроенергію на великі відстані, необхідно вибирати якомога більшу напругу. При використанні змінного струму в довгих ЛЕП виникає ряд технологічних проблем. Головна проблема пов'язана з реактивними параметрами ліній електропередачі. Ємнісний і індуктивне опір

дротів істотно впливають на втрати напруги і потужності при передачі, виникає необхідність підтримки рівня напруги на належному рівні і компенсації реактивної складової, що досить відчутно збільшує вартість прокладки кілометра дроту. Висока напруга змушує використовувати більшу кількість гірлянд ізоляції, а також накладає обмеження на перетин дроту. Все разом збільшує сумарну вагу всієї конструкції і тягне за собою необхідність використовувати більш стійкі та складні за своєю конструкцією опори ЛЕП. Цих проблем можна уникнути, використовуючи лінії постійного струму. Дріт, що використовуються в лініях постійного струму, дешевше і довше служать при експлуатації в зв'язку з відсутністю часткових розрядів в ізоляції. Реактивні параметри електропередачі не роблять істотного впливу на втрати. По лініях постійного струму найбільш ефективно передавати потужність від генераторів, оскільки можливий вибір оптимальної швидкості обертання ротора генератора, що підвищує ККД його використання. Мінусами використання ліній постійного струму є висока вартість випрямлячів, інверторів і різних фільтрів для компенсації неминуче з'являються вищі гармоніки при перетворенні змінного струму в постійний. Але чим вище довжина лінії електропередачі, тим ефективніше використовувати лінії постійного струму. Існує деяка критична довжина ЛЕП, яка дозволяє оцінити доцільність використання постійного струму при інших рівних умовах. За даними американських дослідників для кабельних ліній ефект відчутний при довжинах більше 80 км, але величина ця весь час зменшується при розвитку технологій і здешевлення необхідних комплектуючих. Найдовша лінія постійного струму в світі розташована в Китаї. Поєднує вона ГЕС Сянцзяба (Xiangjiaba Dam) з Шанхаєм. Її довжина становить майже 2000 км при нарузі 800 кВ. Досить багато ліній постійного струму знаходиться в Європі.

На залізничному транспорті класифікація системи тяги визначається за родом струму і значенням напруги в тяговій мережі. На залізницях України експлуатується дві системи електричної тяги: постійного струму напругою 3 кВ і змінного струму напругою 25 кВ з частотою 50 Гц. Для обох зазначених систем тяги створений і експлуатується різноманітний електрорухомий склад (е.р.с.).

Станом на початок 2016 р. експлуатаційна довжина електрифікованих залізниць України становить 9 тис. 877 км, з яких на однофазному змінному струмі 25 кВ 50 Гц електрифіковано 5112,6 км, на постійному струмі 3 кВ електрифіковано 4764,5 км.

Частка електрифікованих ділянок від загальної експлуатаційної довжини залізниць становить приблизно 45 %, при цьому частка електротяги у загальному вантажообігу – 89,7 %.

За абсолютною довжиною електрифікованих залізниць Україна займає 10-те місце серед країн світу і 6-те – серед країн Європи. Оптимальним для країн з розвинутою залізничною інфраструктурою є електрифікація 50 – 60 % загальної довжини залізничних мереж країни з виконанням ними 90 – 95 % загального обсягу перевезень [1].

Під системою тягового електропостачання розуміють комплекс електротехнічних пристроїв, призначених для отримання напруги, що подається в тягову мережу. В Україні використовують три види систем тягового електропостачання: систему постійного струму 3,3 кВ, систему однофазного змінного струму 25 кВ і систему однофазного змінного струму 2х25 кВ. Система тяги змінного струму 25 кВ реалізується при застосуванні двох останніх систем тягового електропостачання. За кордоном (США, Канада) останнім часом знайшла застосування нова система тягового електропостачання змінного струму 50 кВ частотою 50 Гц. У той же час в країнах центральної і північної Європи (Німеччина, Швейцарія, Швеція, Австрія, Норвегія) триває використання давно введеної системи тяги змінного струму напругою 15 кВ зниженої частоти  $16^{2/3}$  Гц. Ця система тяги реалізується в двох системах тягового електропостачання зниженої частоти  $16^{2/3}$  Гц: з обертовими генераторами і перетворювачами, а також із статичними. Основним споживачем енергії в будь-якій системі тягового електропостачання є електрорухомий склад. Принципова схема ділянки залізниці, що електрифікована постійним струмом 3 кВ показана на рисунку 1.1. На схемі наведено ділянку електрифікованої залізниці довжиною 20 - 25 км з двома сусідніми тяговими підстанціями I і II, розташованими поблизу ст. А та В.

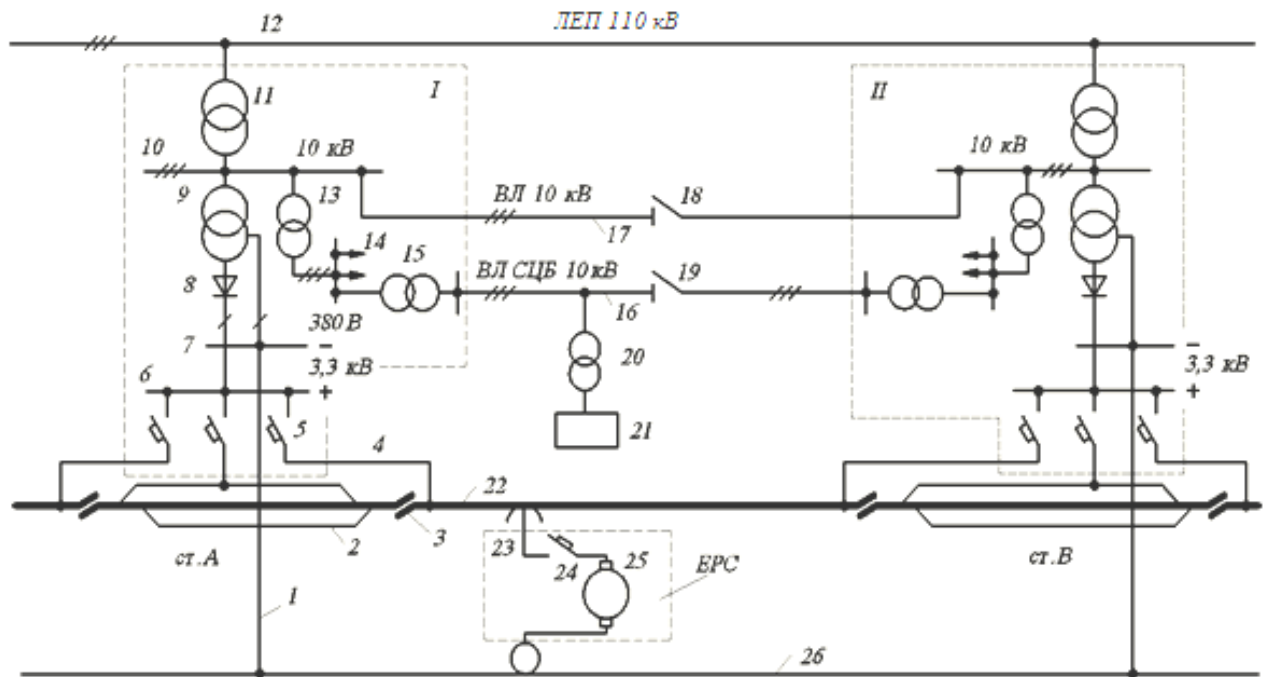


Рисунок 1.1 – Принципова схема ділянки залізниці постійного струму 3 кВ [2]

До лінії електропередачі (ЛЕП) трифазного змінного струму 110 кВ 12 підключений понижуючий трансформатор тягової підстанції 11. Цим трансформатором первинна напруга 110 кВ знижується до 10 кВ і подається на шини 10 розподільного пристрою тягової підстанції. До цих шин підключений перетворювальний агрегат, що складається з перетворювального трансформатора 9 і випрямляча 8. Знижений до 3 кВ напруга на виході перетворювального трансформатора 9 випрямляється і подається на шини «плюс» 6 і «мінус» 7 тягової підстанції. Тягова мережа перегону між підстанціями утворена контактною мережею 22 і рейками 26. Контактна мережа 22 живильної лінії (фідером контактної мережі) 4 через вимикач 5 з'єднана з шиною «плюс» 6, а рейки 26 живильної лінії (рейковим фідером) 1 з шиною «мінус» 7 тягової підстанції. Таким чином, якщо буде включений вимикач 5 фідера контактної мережі (на схемах всі вимикачі показані в початковому відключеному положенні), то в тягову мережу перегону, тобто між контактною мережею 22 і рейками 26, буде подана випрямлена напруга 3,3 кВ постійного струму. Піднявши на е.р.с. струмоприймач 23 і включивши вимикач 24, машиніст збере коло струму через тягові двигуни 25, і е.р.с., споживаючи енергію, почне рухатися. Через інші фідери і вимикачі тягової мережі з шиною «плюс» 3,3 кВ з'єднані: контактна мережа 2 станції А і контактна

мережа перегону зліва від станції. Ділянки контактної мережі перегону 22 і станції 2 відокремлені один від одного ізолюючим сполученням – повітряним проміжком 3, який, проте, забезпечує безперервне струмознімання з контактної мережі при проході по ньому струмоприймача е.р.с. Аналогічним чином на цю ж ділянку тягової мережі 22, 26 подається напруга 3,3 кВ постійного струму з підстанції II. Тим самим забезпечується двостороннє підведення електричної енергії до е.р.с. Розглянемо інші, допоміжні лінії електропостачання ділянки. Щоб забезпечити електричною енергією власні потреби тягової підстанції, а саме живити ланцюги управління, сигналізації, освітлення, опалення і моторну навантаження самої тягової підстанції, на ній встановлюють трансформатор власних потреб 13. Він знижує напругу до 380/220 В змінного струму. Цими напругами і живляться ланцюги власних потреб 14 (на схемі стрілки, що відходять від шин 380/220 В). Уздовж траси залізниці розташовано багато нетягових залізничних споживачів електричної енергії. До них відносяться установки, що належать всім службам дороги, механізми і інструменти, для роботи яких необхідна електроенергія, а також освітлення станцій, переїздів та інших об'єктів. Крім того, електричною енергією забезпечуються деякі промислові підприємства, господарства і т.д., які розташовані по обидва боки залізниці. Для живлення всіх перерахованих споживачів уздовж траси залізниці прокладена трифазна повітряна лінія (ПЛ) 10 кВ 17, підключена до шин 10 кВ 10 двох сусідніх підстанцій I і II. В середині міжпідстанційної зони ПЛ секціонована роз'єднувачем 18, який нормально відключений. Завдяки цьому кожна з підстанцій живить тільки частину нетягових споживачів, які перебувають в міжпідстанційній зоні. При відключенні будь-який з підстанцій роз'єднувач 18 включають і тоді всі нетягові споживачі живляться від однієї, невідключеної підстанції.

Один із найвідповідальніших споживачів електроенергії є пристрої СЦБ (сигналізації, централізації, блокування) і зв'язку, які розташовані уздовж траси залізниці. Відносяться до цих пристроїв і світлофори. Вони отримують живлення від колійних ящиків СЦБ 21 через окремий понижуючий трансформатор 20, який у свою чергу отримує живлення від трифазної ВЛ СЦБ 10 кВ, траса якої проходить уздовж залізниці. Напруга в цю лінію подається від трансформатора 15,



підключеного до шин 380/220 В власних потреб 14 тягової підстанції. ВЛ СЦБ також підключена до обох підстанцій I та II і в середині міжпідстанційної зони секціонована роз'єднувачем 19. Завдяки цьому пристрою СЦБ можуть отримувати живлення відразу від двох підстанцій (при розімкнутому роз'єднувачі 19) або від однієї з них, коли інша відключена і включений роз'єднувач 19. Розглянемо пристрій трифазної ЛЕП 110 кВ 12. На опорі 27 (рис. 1.1, б) розташовуються дві трифазні лінії 110 кВ, одна зліва, інша справа. На металевих траверсах 28 зміцнюються гірлянди ізоляторів 29, до яких підвішуються дроти лінії 12. Розглянемо розріз по двоколійних ділянках дороги (рис. 1.1, б). В нижній частині рисунку 1.1, в видно чотири рейкові нитки 26 залізничної колії двоколійного ділянки (рис. 1.1, а). На опорах контактної мережі 33 підвішені дроти різного призначення: підсилюють дроти – алюмінієві троси 30 – через ізолятори 31 до траверсі 32 з польової сторони опори 33; на консолі 34 через ізолятор 31 несучий трос 35; фіксатор 36, укріплений через ізолятор 31, утримує два контактних проводи 37, не дозволяючи їм переміщатися поперек колії. Сполучені між собою в багатьох точках підсилює провід 30, несучий трос 35 і контактні проводи 37 і утворюють власне контактну мережу перегону 22 (рис. 1.1, а). З польової сторони іншої опори 33 контактної мережі на спеціальних кронштейнах і штирьових ізоляторах 38 кріпиться поздовжня трифазна ВЛ 17 напругою 10 кВ. Всі світлофори 39 отримують живлення через шафу СЦБ 21 і кабель 42 від однофазного понижувального трансформатора 20, приєднаного до лінії передачі СЦБ 10 кВ 16, що проходить уздовж залізниці на власних опорах 40. Провід ЛЕП СЦБ укріплений на штирьових ізоляторах 41.

Принципова схема ділянки залізниць, електрифікованих по системі змінного струму 25 кВ (рис. 1.2, а). На схемі наведено ділянку електрифікованої залізниці довжиною 40 - 50 км з двома тяговими підстанціями I і II, розташованими поблизу станцій А і В. До лінії електропередачі 12 трифазного змінного струму 110 кВ підключений понижуючий триобмотковий трансформатор 10 тягової підстанції. Цим трансформатором первинна напруга 110 кВ знижується до 25 кВ, а також до 35 або 10 кВ. Напруга 25 кВ подається на шини 7, 8 і 9 (відповідно фази в, а й с) і

використовується для живлення тягової мережі, а напруга 35 (або 10) кВ – на шини *II* і використовується для живлення прилеглої до підстанції району.

Для рівномірного завантаження всіх трьох фаз системи зовнішнього електропостачання (їй належить ЛЕП 110 кВ) в тягову мережу станції *A* і перегону зліва від неї подається напруга, що відрізняється по фазі від напруги, що подається в тягову мережу перегону справа. Для цього ділянки контактної мережі зазначених перегонів і станції, а також рейки, приєднані до різних фаз шин 27,5 кВ: контактна мережа перегону 26 через фідер контактної мережі 4 і вимикач 5 підключена до шини фази *B*, контактна мережа станції 1 і перегону зліва від неї – до шини фази *A*, а рейки через рейковий фідер 6 – до шини фази *C*. При такому підключенні до шин 27,5 кВ з'єднання контактної мережі зліва від станції *A* з контактною мережею станції струмоприймачами рухається е.р.с. 27 можливо, так як вони приєднані до однієї і тієї ж фази *A*. Поєднання ж контактної мережі 1 станції і контактної мережі 26 перегону праворуч від підстанції неприпустимо, оскільки вони приєднані до двох різних фаз *A* і *B*. Таке з'єднання призведе до короткого замикання фаз *A* і *B* понижувального трансформатора 10. Тому ділянки контактної мережі 1 станції і перегону зліва від неї розділені повітряним проміжком 2, а станції і перегону справа – двома повітряними проміжками 2 і нейтральною вставкою між ними 3. Наявність нейтральної вставки 3 виключає навіть короточасне замикання фаз *A* і *B* трансформатора 10 струмоприймачами е.р.с. при проході ними цієї ділянки тягової мережі.

Подача напруги в тягову мережу перегону відбувається при включенні вимикача 5 фідера контактної мережі. Після цього машиніст е.р.с. може, піднявши струмоприймач 27 і включивши вимикач 28, подати змінну напругу на первинну обмотку понижувального тягового трансформатора 31. Напруга на вторинній обмотці тягового трансформатора випрямляється випрямлячем 32 і через згладжуючий реактор 29 підводиться до тягових двигунів 30. Через електродвигуни починає протікати струм, який приводить їх і е.р.с. в рух. У тягову мережу перегону між підстанціями напруга подається від двох підстанцій *I* і *II*. При цьому забезпечується двостороннє підведення енергії до е.р.с. Зауважимо, що для

забезпечення двостороннього живлення е.р.с. і рівномірного завантаження фаз ЛЕП 110 кВ знижувальні трансформатори двох сусідніх підстанції I і II приєднані до ЛЕП 110 кВ неоднаково, а слідуючи за спеціально розробленими правилами. Розглянемо інші допоміжні лінії електропостачання ділянки. Від шин тягової напруги 27,5 кВ отримують живлення також нетягові споживачі. Для цього через вимикач 20 до шин 7 і 8 підключають два дроти, що розміщуються на опорах контактної мережі з польової сторони. Понижуючі трансформатори споживачів 22 підключаються до цих проводів і рейок. Така система живлення отримала назву ДДР (два дроти – рейка). В середині лінії ДДР встановлений роз'єднувач 23. Нормально ліва половина лінії ДДР живиться від підстанції I, а права – від підстанції II, роз'єднувач 23 розімкнутий. У разі необхідності (наприклад, при відключенні однієї з підстанцій) вся лінія ДДР може отримувати живлення від однієї підстанції. При цьому роз'єднувач 23 включається.

Енергію для власних потреб тягової підстанції (живлення ланцюгів управління, сигналізації, освітлення, опалення, моторної навантаження) отримують від трансформатора власних потреб (ТВП) 13 через шини власних потреб 14 (на рис. 1.2, а навантаження власних потреб позначені стрілками). Від шин власних потреб 14 через трансформатор 15 напруга подається в лінію 16, призначену для живлення пристроїв СЦБ і зв'язку. Від цієї лінії через малопотужні понижуючі трансформатори 18 і релейні шафи СЦБ 19 живляться світлофори. В середині лінії 16 встановлено роз'єднувач 17. Це дає можливість жити лінію від будь-якої з двох підстанцій I або II (при замкнутому роз'єднувачі 17) або ж кожену половину лінії жити від своєї підстанції (при розімкнутому роз'єднувачі). Так як від роботи пристроїв СЦБ безпосередньо залежить виконання графіка руху поїздів на ділянці, вони повинні мати резервне джерело живлення. Пристрої СЦБ отримують резервне живлення по лінії 24 через понижуючі однофазні трансформатори 25 від лінії ДДР 21. Розглянемо розріз по двоколієних ділянках дороги (рис. 1.2, б). Трифазна комплектна трансформаторна підстанція (КТП) 34, що складається з трансформатора 22 і супутнього устаткування, отримує живлення від лінії ДДР 21 через дроти 36. Один провід лінії ДДР 21 через ізолятори 37

підвішується до консолі 38 з польової сторони опори контактної мережі 39, а інший – з польової сторони опори 45 другої колії. Третій вивід КТП приєднується дротом 35 до рейок 33. На ізольованій консолі 41, закріпленої на опорі через ізолятори 40, підвішений несучий трос 42. Одиночний контактний дріт 44, утримуваний фіксатором 43, займає задане положення щодо осі шляху. Електрично з'єднані в багатьох точках несучий трос 42 і контактний дріт 44 і складають контактну мережу 26 (рис. 1.2, а). Світлофор 46 отримує напругу від малопотужного понижуючого однофазного трансформатора 18 через кабель 24 і релейну шафу СЦБ 19. Трансформатор 18 підключений до трифазної лінії передачі 10 кВ 16. Дроти цієї лінії кріпляться на штирьових ізоляторах 48 опор 47, які встановлені паралельно залізниці спеціально для лінії СЦБ.

Розглянемо прохід повітряного проміжку 2 перед нейтральною вставкою 3 поїздом, що йде зі станції А в сторону станції В. За правилами цей повітряний проміжок, як і нейтральну вставку, поїзд повинен проходити при відключених тягових електродвигунах або, тобто, без струму. В іншому випадку можливий перепал вітки контактного дроту 1 проміжку 2, що належить ст. А. Розглянемо це важливе питання. Якщо подивитися на повітряний проміжок 2 збоку (рис. 1.2, в), то видно що, висота підвісу контактних проводів віток 1 і 3 в межах повітряного проміжку поступово змінюється. У напрямку зліва направо контактний дріт вітки 1 піднімається, а вітки 3 опускається. У точці *a* висоти підвісу обох дротів рівні. Тому, рухаючись по повітряному проміжку в напрямку стрілки, струмоприймач е.р.с. до точки *a* ковзає по дроту вітки 1 (позиція *к*), а після точки *a* – по дроту вітки 3 (позиція до + 1).

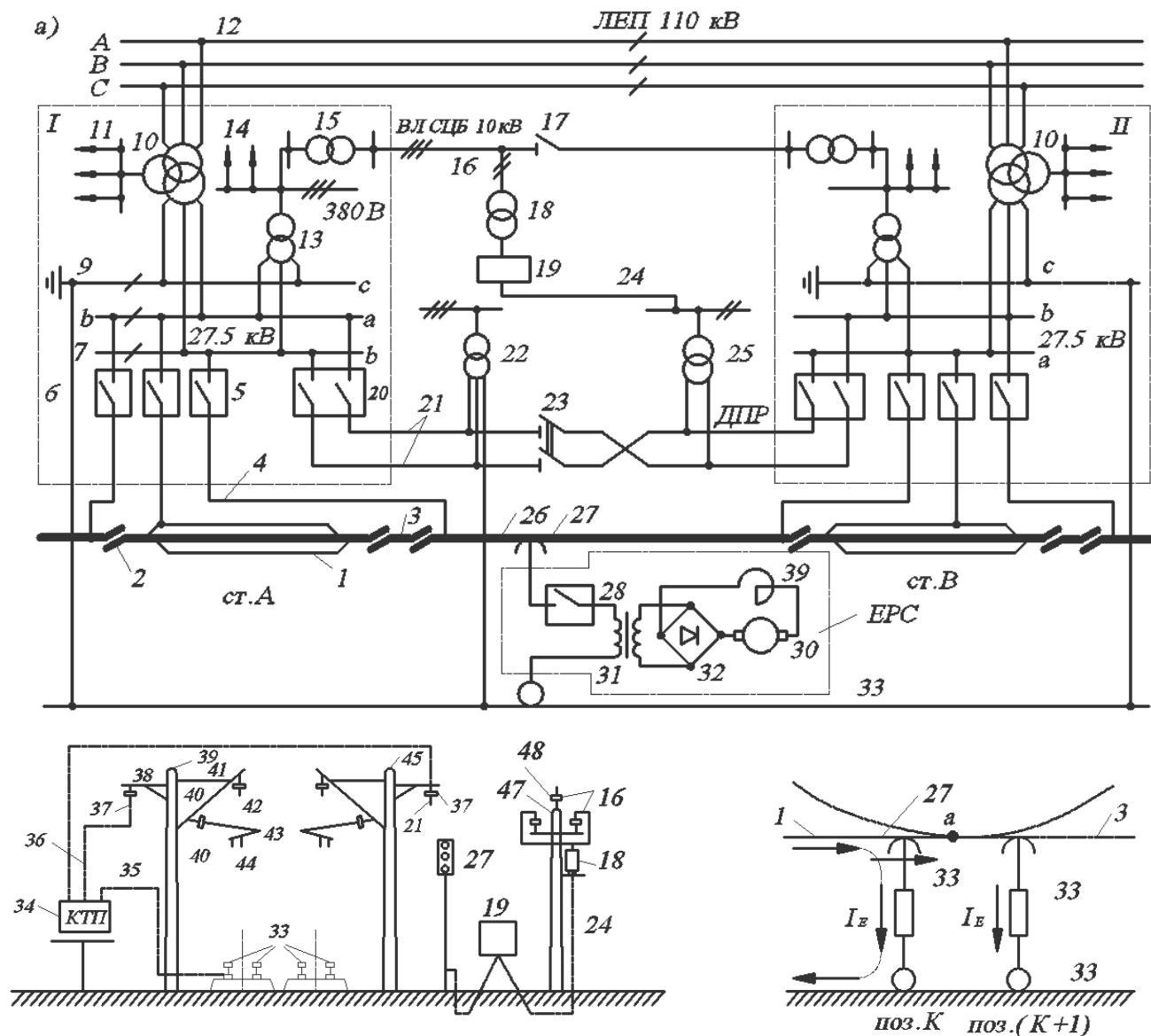


Рисунок 1.2 – Принципова схема ділянки залізниці, електрифікованої по системі змінного струму 25 кВ (а), розріз його двоколіїної ділянки (б) і схема, яка пояснює процес проходження поїздом повітряного проміжку нейтральної вставки (в) [2]

На дріт 1 подано напругу фази А (рис. 1.2, а), на дріт же 3, що належить нейтральній вставці, напругу не подано. З цієї причини, рухаючись по повітряному проміжку, е.р.с. може споживати струм тільки до точки а. Після її проходу контакт між контактним дротом 1 і струмоприймачем 27 припиняється, і струм через двигуни е.р.с. повинен перерватися. Однак при великому струмі (кілька сотень ампер) цього відразу не відбувається, між контактним дротом і струмоприймачем загоряється електрична дуга 49, яка за кілька часток секунди перепалює дріт 1. Тому машиніст

і повинен вимикати електродвигуни (відключати струм) під'їжджаючи до нейтральної вставки. Однак передчасне відключення струму може викликати зупинку поїзда на нейтральній вставці, отже, проїзд нейтральної вставки вимагає від машиніста великої уваги.

Головними перевагами системи змінного струму напругою 25 кВ є більш висока напруга в контактній мережі і можливість легко знизити цю напругу трансформатором електровоза. Електровоз потужністю 6000 кВт на постійному струмі споживає з контактної мережі струм 2000 А, а на змінному лише 300 А. Тому контактна мережа постійного струму важка, має велике число дротів. Це зазвичай два мідних контактних дроти перерізом 100 мм<sup>2</sup> кожен, мідний несучий трос перетином 120 мм<sup>2</sup> і ще один або два підсилюючих алюмінієвих дротів перерізом 185 мм<sup>2</sup> кожен. На змінному струмі контактна мережа легша і складається з одного мідного контактного дроту перетином 100 мм<sup>2</sup> і біметалічного несучого тросу перерізом 95 мм<sup>2</sup>. Конструкція підстанції змінного струму в порівнянні з підстанцією постійного струму більш проста завдяки відсутності випрямних агрегатів. Кількість підстанцій на лініях при системі змінного струму менше, оскільки розташовуються вони на більших (40 - 60 км) відстанях. Один з недоліків системи змінного струму полягає в її значному впливі на лінії зв'язку, оскільки змінний струм створює навколо дротів змінне електромагнітне поле. Доводиться лінії зв'язку, що проходять уздовж залізниць, виконувати кабельними, а не повітряними, як на постійному струмі, що призводить до збільшення вартості електрифікації залізниць. Крім того, виникають проблеми несиметрії струмів і напруг через те, що електровози споживають однофазний струм, а лінії передачі трифазні. З'являється необхідність монтажу нейтральних вставок у кожній підстанції. Наявність таких вставок збільшує ймовірність перепалів контактного дроту.

У деяких країнах (США, Канада) з'явилася нова система тягового електропостачання – система змінного струму напругою 50 кВ частотою 50 або 60 Гц. Ця система аналогічна системі змінного струму 25 кВ, але більш висока напруга дає можливість істотно збільшити передану по тяговій мережі електричну

потужність. Однак при цьому доводиться посилювати ізоляцію контактної мережі, збільшувати габарити між пристроями, що знаходяться під напругою, і заземленими частинами, і, звичайно, потрібен новий електрорухоми́й склад, розрахований на напругу 50 кВ.

Прагнення підвищити потужність, передану по тяговій мережі, шляхом збільшення напруги при одночасному бажанні використовувати стандартний електрорухоми́й склад на напругу 25 кВ призвело до виникнення системи змінного струму 2x25 кВ. При цій системі електрична енергія від тягової підстанції до е.р.с. передається в два етапи: спочатку при напрузі 50 кВ, а потім 25 кВ. Для цього на опорах контактної мережі з польової сторони доводиться підвішувати ще один так званий провід живлення (напруга між ним і дротами контактної мережі і становить 50 кВ), і встановлювати на перегоні між підстанціями автотрансформатори 50/25 кВ. Система 2x25 кВ широко застосовується і в інших країнах (Японія, Франція). Вона розглядається як засіб посилення цих ліній.

Принципова схема ділянки залізниці, електрифікованої по системі змінного струму 15 кВ зниженої частоти  $16^{2/3}$  Гц з обертовими перетворювачами показана на рис. 1.3). У деяких країнах широкого поширення набула система змінного струму зниженої частоти. За цією системою працюють з перших років електрифікації залізниці країн центральної та північної Європи: Німеччини, Швейцарії, Швеції, Австрії, Норвегії. Зниження частоти пояснюється прагненням використовувати на змінному струмі тяговий електродвигун послідовного збудження, широко застосовуваний в електричній тязі на постійному струмі. Момент, що обертає на валу електродвигуна пропорційний твору струму і магнітного потоку, тому електродвигун послідовного збудження здатний працювати і на змінному струмі, оскільки напрями струму і магнітного потоку змінюються одночасно. Однак змінний магнітний потік електродвигуна призводить до виникнення так званої трансформаторної ЕРС в обмотці якоря двигуна. При значній ЕРС з'являється сильне іскріння під щітками, аж до кругового вогню по колектору при комутації. Щоб уникнути цього, необхідно знизити частоту струму. Технічно найпростіше знизити частоту рівно в 3 рази: з 50 до  $16^{2/3}$

Гц. Цим і пояснюється поява електрифікованих ділянок 15 кВ частоти  $16^{2/3}$  Гц. Розглянемо таку ділянку довжиною 35 - 40 км з двома сусідніми тяговими підстанціями I і II, розташованими поблизу ст. А та В (рис. 1.3).

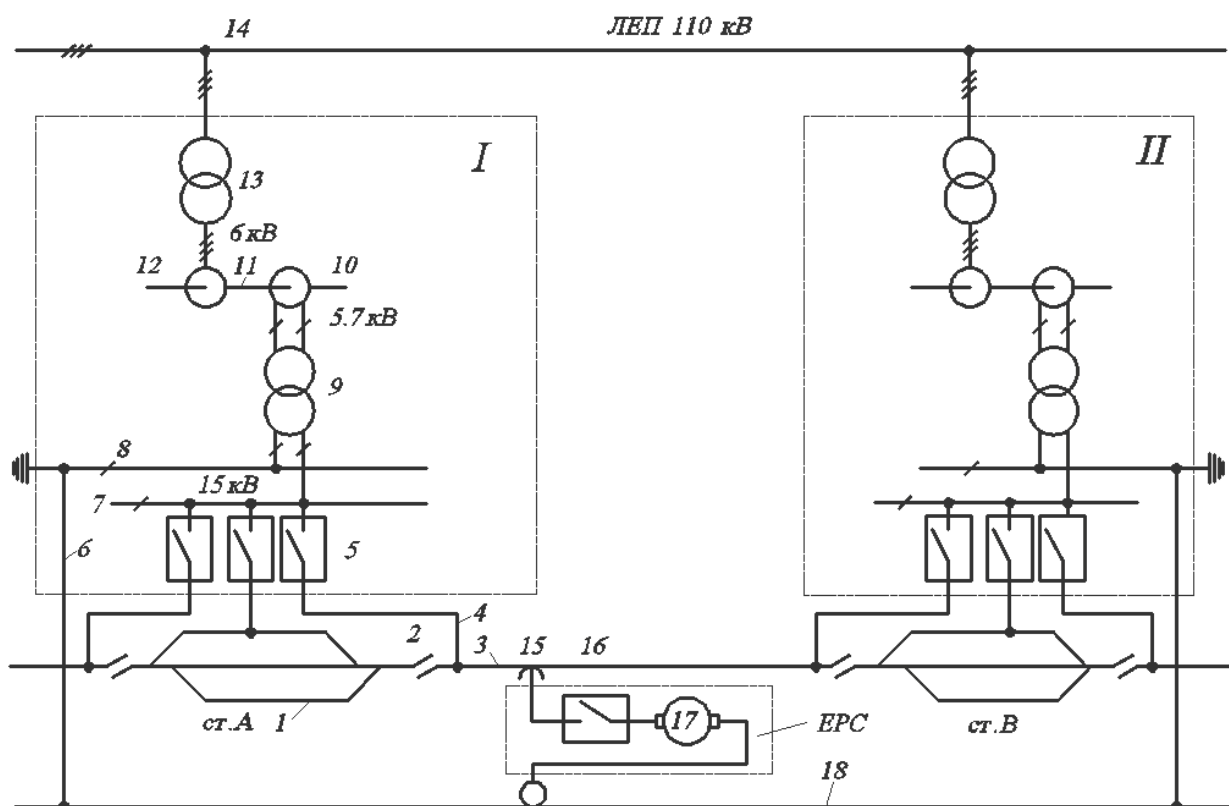


Рисунок 1.3 – Принципова схема ділянки дороги, електрифікованої по системі змінного струму 15 кВ зниженої частоти  $16^{2/3}$  Гц з обертовими перетворювачами

До лінії електропередачі (ЛЕП) трифазного змінного струму 110 кВ 14 підключений трансформатор тягової підстанції 13, що знижує напругу до 6,0 кВ. Ця напруга подається на синхронний трифазний електродвигун 12, на валу 11 якого встановлено синхронний однофазний генератор 10 з вихідною напругою 5,7 кВ частотою  $16^{2/3}$  Гц. Отримана напруга підвищується трансформатором 9 до 15 кВ і подається на шини 8 і 7 тягової підстанції. Одна з шин 8 рейковим фідером 6 з'єднана з рейками, а інша через фідерні вимикачі 5 і, фідер контактної мережі 4 – з контактною мережею перегону 3. Таким чином, після включення фідерного вимикача 5 тягова мережа перегону, утворена контактним дротом 3 і рейкою 18, виявляється під напругою. Після цього машиніст е.р.с. може, піднявши



струмоприймач 15 і включивши вимикач 16, подати напругу на двигуни 17. Останні починають обертатися, і е.р.с. приходить в рух.

Контактна мережа 1 ст. А підключена до тієї ж шини 7, що і мережа 3 перегону, тому перегін і станція в цій системі відокремлені простим по конструкції повітряним проміжком 2, а не двома частинами періоду з нейтральною вставкою, як при системі 25 кВ. Недоліки системи 15 кВ зниженої частоти полягають перш за все в тому, що ця система вимагає громіздких обертових перетворювачів. Трансформатори, що працюють на зниженій частоті, масивні через велику площу перетину сталевих сердечників, так як для створення необхідної ЕРС при зниженій частоті потрібний більший магнітний потік. При деякій граничній для сталі індукції його можна отримати тільки збільшуючи площу перетину осердя трансформатора. Однак система зниженої частоти  $16^{2/3}$  Гц має і переваги: індуктивний опір тягової мережі (пропорційний частоті) в 3 рази менше, ніж при частоті 50 Гц (відповідно падіння напруги в мережі менше і відстані між тяговими підстанціями можуть бути збільшені), електромагнітний вплив на лінії зв'язку через більш низькі частоти незначне. Оскільки електрична енергія з трифазної мережі передається в однофазну через механічну ланку (вал 11 між двигуном і генератором), то знімаються всі проблеми несиметрії струмів і напруг, в контактній мережі не потрібні нейтральні вставки. Країни, які вже мають у себе мережу електрифікованих ліній змінного струму зниженої частоти, продовжують електрифікацію по цій же системі. Однак інші країни систему зниженою частоти не застосовують.

Структурно - конструктивні особливості тягових підстанцій.

Класифікувати тягові підстанції прийнято за такими ознаками:

- напрузі і роду струму (постійний чи змінний), при яких енергія від тягової підстанції надходить до електрорухомого складу;
- первинній напрузі, тобто напрузі в лінії електропередачі, до якої підключена тягова підстанція з боку системи зовнішнього електропостачання;
- схемою приєднання тягової підстанції до системи зовнішнього електропостачання;

- способу обслуговування тягової підстанції;
- способу управління обладнанням тягової підстанції.

За першою ознакою розрізняють тягові підстанції: постійного струму напругою 3,3 кВ; змінного струму напругою 25 кВ; змінного струму напругою 2х25 кВ і постійно-змінного струму (стикові), які обслуговують ділянки двох систем тяги в місці їх стикування.

Підстанції постійного струму використовують первинну напругу класів 6-10-35-110 і 220 кВ, змінного – 110 і 220 кВ. До системи зовнішнього електропостачання тягові підстанції можуть приєднуватися за різними схемами. Підстанції, що приєднуються за схемами, наведеними на рисунку 1.4, а, б і в, називають проміжними, за схемою на рис. 1.4, г – опорними. У свою чергу, проміжні підстанції поділяються на проміжні транзитні (рис. 1.4, а, б) і проміжними на відгалуженнях (рис. 1.4, в). Особливість приєднання підстанції неодмінно відбивається на схемі самої підстанції.

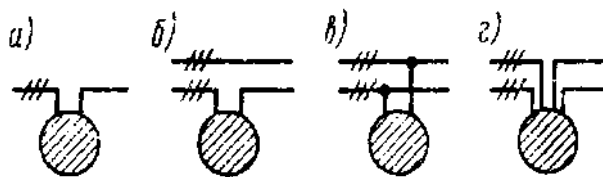


Рисунок 1.4 – Принципові схеми приєднання тягових підстанцій до системи зовнішнього електропостачання [2]

За способом обслуговування тягові підстанції діляться на підстанції без чергового персоналу, з чергуванням на дому і з постійним черговим персоналом. За системою управління розрізняють: телекеровані підстанції, тобто такі, обладнання яких може включати і відключати диспетчер, використовуючи систему телеуправління і перебуваючи при цьому на значній відстані від підстанції (100 - 250 км); без телеуправління, тобто такі, для управління якими потрібно бути безпосередньо на тяговій підстанції.

Структурними називають схеми, що показують принцип виконання електроустановки на рівні великих функціональних вузлів – структур. Одним з

найбільш важливих функціональних вузлів будь-якої підстанції, в тому числі тягової, є розподільний пристрій (РП). Призначення розподільного пристрою складається в прийомі електричної енергії від будь-якого джерела по спеціальних лініях (вводів) і розподіл її по споживачах за допомогою вихідних ліній живлення.

Інший, не менш важливий функціональний вузол підстанції – трансформатор. Розрізняють знижувальні трансформатори, призначення яких зводиться до зниження напруги, і перетворюючі трансформатори, призначення яких полягає в зниженні напруги і, за необхідності, одночасно в збільшенні числа фаз на вторинній обмотці. Перетворювальні трансформатори живлять випрямлячі і інвертори. Останні також можна розглядати, як окремі функціональні вузли. Випрямлячі перетворюють (випрямляють) змінний струм в постійний, який потім використовується електрорухомим складом. Інвертори виконують зворотне перетворення енергії постійного струму, що виробляється е.р.с. під час рекуперації, в енергію змінного струму, на якому вона через перетворюючі трансформатор повертається в систему зовнішнього електропостачання.

Структурна схема проміжної тягової підстанції постійного струму 3,3 кВ з первинною напругою 110 (220) кВ і РП 35 кВ для живлення району. Основні функціональні вузли тягової підстанції (рис. 5): I - РП 110 (220) кВ; II - понижуючий трансформатор; III - РП 35 кВ; IV- РУ 10 кВ; V – перетворюючий трансформатор; VI - випрямляч; VII - РП 3,3 кВ; VIII – згладжуючий пристрій.

Через вводи 1 трифазну напругу 110 (220) кВ, що передається по трьох дротах, подається в РП 110 (220) кВ I, звідки по з'єднанням 2 – до знижувальних трансформаторів II. Ці трансформатори трьохобмоточні, тому обмотками ВН і НН вони знижують первинну напругу до 10 кВ, а обмотками ВН і СН – до 35 кВ. Через введення 5 напруга 10 кВ надходить в РП 10 кВ IV, а через введення 3 напругу 35 кВ – в РП 35 кВ III. За лінії живлення 4 напруга 35 кВ подається в РП 35 кВ трансформаторних підстанцій району (на схемі не показані), по лініях 6 напруга 10 кВ подається від РП 10 кВ IV для живлення нетягових залізничних споживачів. Лінії зазвичай розміщуються з польової сторони на опорах контактної мережі (рис. 1.1).

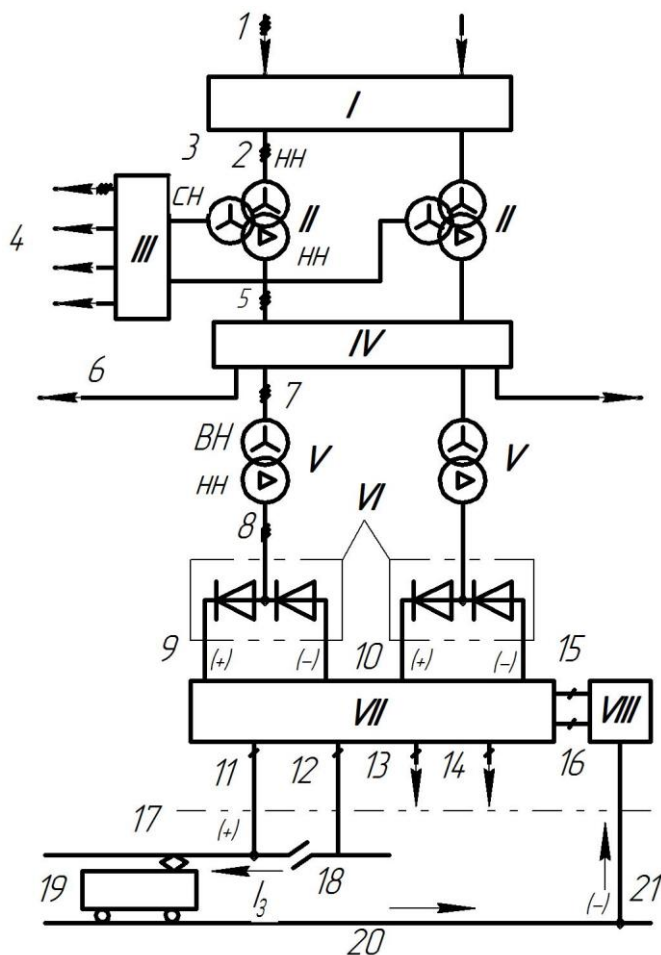


Рисунок 1.5 – Структурна схема проміжної тягової підстанції постійного струму 3,3 кВ [2]

За з'єднанням 7 від того ж РП 10 кВ отримують трифазну напругу перетворювальні трансформатори V. Вони знижують напругу до 1,52 кВ. Ця напруга подається на випрямлячі VI, які перетворюють його в напругу постійного струму 3,3 кВ. Тому від випрямлячів в РП 3,3 кВ VII йдуть вже всього два дроти (дві шини): 9 і 10. Потенціал шини 9 вище (він позначений знаком «+»), шини 10 нижче (він позначений знаком «-»), а різниця потенціалів між шинами (напруга) становить 3,3 кВ. Через РП 3,3 кВ живить лінію (фідер) контактної мережі 11 потенціал шини 9 (+) подається на ділянку контактної мережі 17, а через згладжуючий пристрій VIII і рейковий фідер 21 потенціал шини 10 (-) - на рейки 20. Згладжуючий пристрій VIII призначений для різкого (в 50 - 100 разів) зниження пульсацій струму в тяговій мережі, які виникали б під дією пульсуючої, не ідеально згладженої напруги на виході випрямляча VI і наводили перешкоди в лінії

дротового зв'язку, що проходить паралельно трасі залізниці. На інші ділянки контактної мережі потенціал шини 9 (+) подається через фідери контактної мережі 12, 13, 14. Сусідні ділянки по одному шляху розділені повітряним проміжком 18. Власне схема тягової підстанції закінчується там, де на рис. 5 проходить штрихова лінія (нижче РП 3,3 кВ). Таким чином, між будь-якою ділянкою контактної мережі і рейками різниця потенціалів (напруга) в залежності від величини тягового навантаження підстанції становить величину 2,7 - 3,3 кВ. Це дає можливість машиністу е.р.с. 19, підключивши двигуни, зібрати замкнуте коло струму. При цьому двигуни почнуть споживати електричну енергію, перетворюючи її в механічну енергію руху поїзда. Як вже зазначалося, електричну енергію виробляють генератори електричних станцій системи зовнішнього електропостачання, звідки вона передається спочатку через ЛЕП і районні підстанції системи зовнішнього електропостачання, а потім вже через тягову підстанцію і тягову мережу до е.р.с. 19. Відповідно до загальних закономірностей передача електричної енергії супроводжується втратами у всіх ланках ланцюга передачі: від джерела до споживача. Це означає, що якщо споживач (е.р.с. 19) отримав за деякий час  $W_E$  кВт-год енергії, то електричні станції системи повинні виробити за цей же час  $W = W_E/\eta$  кВт-год активної енергії, де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії при передачі енергії. Суттєве й інше: одночасно з активною енергією  $W$ , кВт-год, станції повинні за цей же час виробити ще й реактивну енергію  $W_P$ , квар-год, яка не виробляє роботи, а лише завантажує систему протіканням реактивної складової струму. Ця енергія визначається індуктивністю при передачі і властивостями споживачів активної енергії. Без споживання реактивної енергії не може працювати жоден перетворювальний агрегат, під яким розуміють випрямляч і перетворювальний трансформатор, взяті як єдине ціле.

Для повного розуміння процесів перетворення енергії в схемі даної тягової підстанції необхідно звернути увагу на наступне: між справжніми джерелами електричної енергії – електричними станціями і е.р.с. існує кілька гальванічно, тобто електрично розділених, але магнітопов'язаних контурів струму, в кожному з яких існує своє умовне джерело енергії і умовний споживач енергії. При цьому всі

умовні джерела і споживачі енергії мають ознаки справжніх. У даній схемі таких контурів три. Перший – контур постійного струму 3,3 кВ. Умовне джерело енергії: випрямлячі VI спільно з обмотками НН перетворювальних трансформаторів. Умовний споживач, він же істинний – е.р.с. Ланцюг струму (відповідно до прийнятого позитивного напрямку струму електровоза  $I_e$ , позначено стрілкою) замикається послідовно: нн V - 8 - V - 9 - VII - 11 - 17 - 19 - 20 - 21 - VIII - 1 - 15 - VII - VI - нн V. Встановлено, що найбільше падіння напруги в цьому контурі доводиться на е.р.с. Це означає, що е.р.с. споживає і основну частку енергії, що витрачається в цьому контурі, де вона в основному перетворюється в електричну енергію руху поїзда і лише частково втрачається у вигляді тепла. Другий – контур трифазного змінного струму 10 кВ. Умовне джерело енергії: обмотки НН трансформаторів II, умовний споживач: обмотки ВН перетворювальних трансформаторів V. Струми протікають по трьох дротах (фазах) розглянутого контуру. Найбільша частка активної складової падіння напруги доводиться на обмотки ВН трансформаторів V, що і дає право вважати їх споживачем енергії. Закономірна особливість двох розглянутих магнітопов'язаних контурів полягає в тому, що розділяючий їх елемент – перетворюючі трансформатори V – є одночасно джерелом енергії в першому контурі і споживачем – у другому. Це має фізичне пояснення: тільки споживши велику частину енергій в другому контурі, можна забезпечити економічну її передачу е.р.с. в першому. Третій – контур змінного струму 110 (220) кВ (наведено на рис. 5 частково). Умовний споживач: обмотки ВН понижуючих трансформаторів II. Умовне джерело на схемі не показаний і знаходиться в системі зовнішнього електропостачання. Найімовірніше, це вторинні обмотки знижувальних трансформаторів районних підстанцій або ж обмотки підвищувальних трансформаторів електричної станції. Значить, розглянутий третій контур не є останнім і до істинного джерела електричної енергії – генераторів електричних станцій ще повинен бути як мінімум один магнітопов'язаний контур. Найбільша частка активної складової падіння напруги в контурі доводиться на обмотки ВН понижуючих трансформаторів II.

Тягова підстанція постійного струму (рис. 1.6). Підстанція має ту ж структурну схему, що і на рис. 5. У лівій верхній частині рисунка видно РП 110 кВ I. Серед обладнання виділимо вимикач 41, роз'єднувачі 39 і 43, відділювач 46 і розрядник 42. Всі ці елементи забезпечують нормальне функціонування розподільного пристрою даного типу. На трьох дротах приєднання 2, що знаходиться між ізоляторами 116, укріпленими на порталах 115 РП, і ізоляторами 126 на порталах 127, подається напруга на знижувальні трансформатори II. Від кожного понижувального трансформатора відходить введення 5 в РП 10 кВ IV, яке розташоване всередині будівлі підстанції 132, у його лівій стіні, і видно на рис. 6 завдяки умовно знятого даху будівлі тягової підстанції. У нижньому правому куті будівлі тягової підстанції та в прибудові зовні VIII розміщено згладжувальний пристрій. З будівлі підстанції фідерами 11 - 14 і рейковим фідером 21 випрямлена напруга постійного струму 3,3 кВ подається в тягову мережу. РП 35 кВ тягової підстанції III змонтовано в лівій частині її території і виконано зі стандартних блоків 109, об'єднаних системою збірних шин 110. Шини закріплені між поперечиною 113, укріпленими на опорах 11, і ізольовані від останніх гірляндами ізоляторів 112. РП 35 кВ отримує живлення по вводах 3 через блок введення 125 і лінію 119 від тих же понижуючих трансформаторів II.

Порівняльне масштабне зіставлення елементів території тягової підстанції можна провести, взявши за базу відліку довжину вагона масляного господарства 121 (20 м), що вводиться на територію тягової підстанції.

Крім розглянутих, на рисунку видно й інші елементи конструкції тягової підстанції: рама РП 110 кВ, що складається з опор 103 і поперечин 104, 108, окремо розташовані опори з громовідводами 133 і ін. Структурна схема опорної тягової підстанції змінного струму 25 кВ з первинною напругою 110 (220) кВ і РП 10 кВ для живлення району (рис. 1.7).

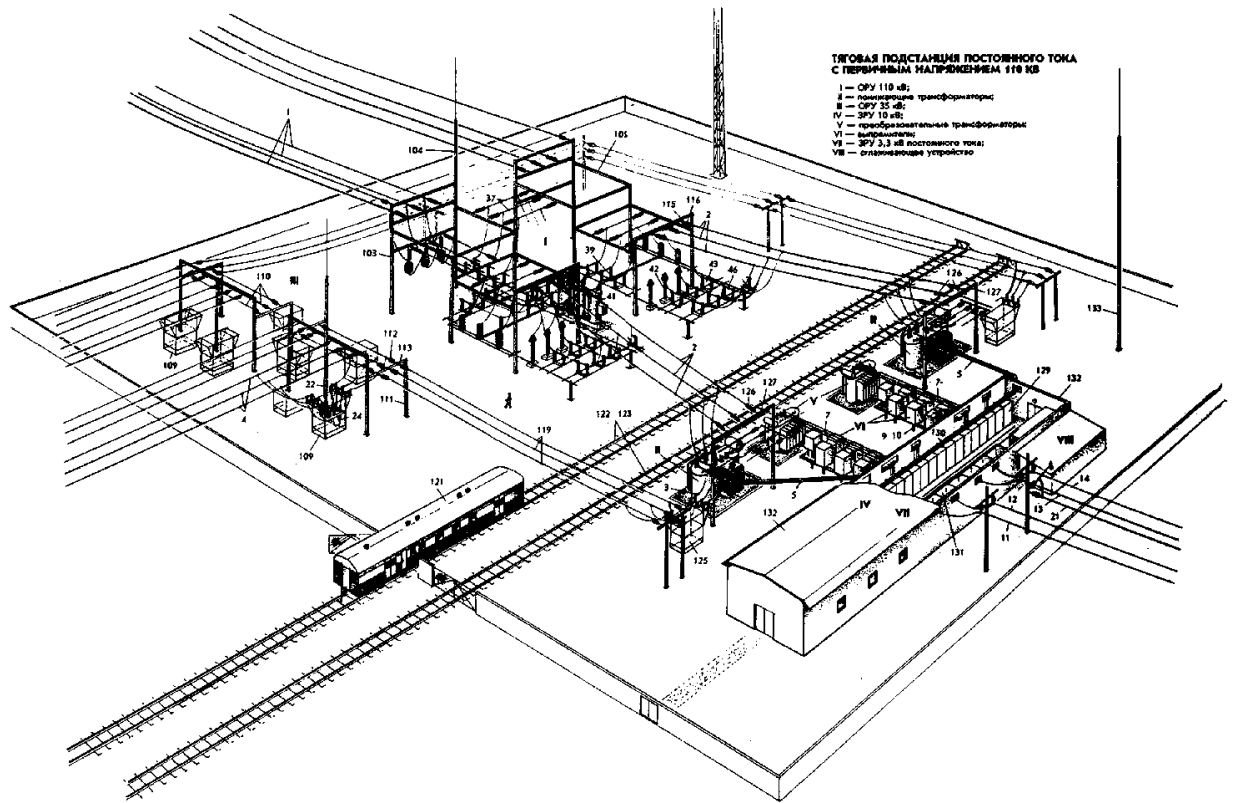


Рисунок 1.6 – Тягова підстанція постійного струму [2]

Основні функціональні вузли тягової підстанції: I - РП 1 10 (220) кВ; II - знижувальні трансформатори; III - РП 10 кВ; IV - РП 25 кВ. По вводах 1 трифазну напругу 110 (220) кВ подається в РП 110 (220) кВ. Це РП має більш складну схему і конструкцію, ніж РП такої ж напруги (рис. 6), оскільки воно призначене для прийому і розподілу енергії, яка може надходити відразу за чотирма вводах. За приєднанням 2 трифазну напругу від РП 110 (220) кВ підводиться до трьохобмоткових знижувальних трансформаторів II, які обмотками ВН і СН знижують первинну напругу до 25 кВ, а обмотками ВН і НН – до 10 кВ. Напруга 25 кВ використовується для живлення е. р. с., а 10 кВ – району. Останнє від трансформаторів II підводиться по вводах 3 до РП 10 кВ тягової підстанції III, звідки по лінії живлення 4 до трансформаторних підстанцій споживачів району.



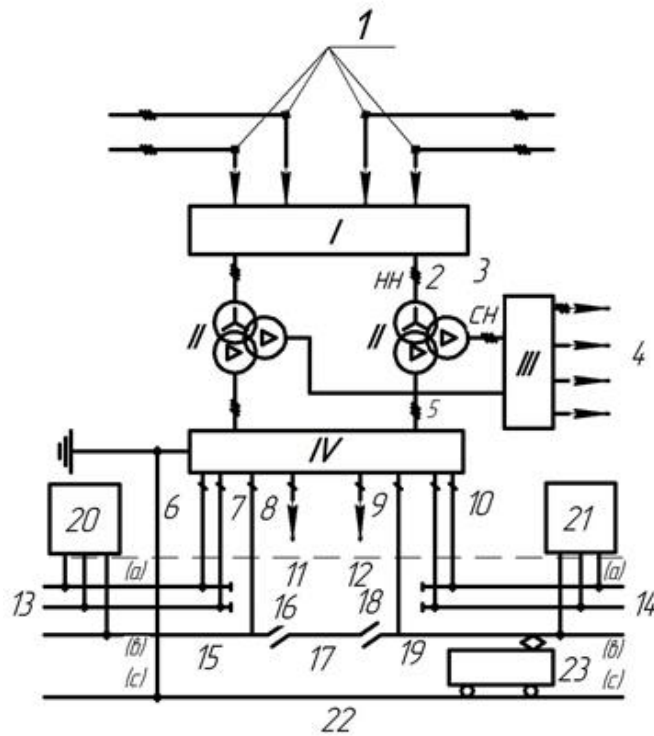


Рисунок 1.7 – Структурна схема опорної тягової підстанції змінного струму 25 кВ [2]

Підведення напруги 25 кВ до ділянок тягової мережі зліва і праворуч від підстанції забезпечується через РП25 кВ IV по фідерах контактної мережі 8 (фаза А), 9 (фаза В) і рейковому фідері 6 (фаза С). На ділянку тягової мережі зліва від підстанції (між контактною мережею 15 і рейками 22) подається однофазну напругу 25 кВ (діюче значення), а на ділянку праворуч (між контактною мережею 19 і рейками 22) – однофазну напругу також з діючим значенням 25 кВ. Через різницю фаз напруг між ділянками контактної мережі зліва 15 і праворуч 19 вони розділені нейтральною вставкою 17. Від РП 25 кВ через двофазні фідери 7 і 10 подається напруга також і в лінії ДДР, відповідно зліва 13 і праворуч 14, використовувані для живлення нетягових споживачів 20 і 21.

Споживання енергії е.р.с. 23 починається після підключення його ланцюгів між контактною мережею 19 і рейками 22. При цьому енергія від істинного джерела електричної енергії – електричних станцій (на схемі не показані) – до істинного споживача – е.р.с. 23 – передається послідовно через кілька магнітопов’язаних, але гальванічно розділених контурів струму, в кожному з яких існує своє умовне джерело й умовний споживач енергії. У межах від вводів I і до

поїзда 23 два таких контуру. Перший – контур змінного тягового струму 25 кВ. Умовне джерело енергії – обмотки СН трансформатора. Споживач енергії – е.р.с. 23. Тяговий струм замикається по контуру СН II - 5 - IV - 9 - 19 - 23 - 22 - 6 - IV - 5 - СН II. Максимальна частка активної складової падіння напруги – на е.р.с. 23. Другий – контур змінного струму 110 (220) кВ. Умовний споживач – обмотки ВН трансформатора II. Умовне джерело на рисунку не показаний, але найімовірніше це обмотки знижувальних трансформаторів районних підстанцій або ж обмотки підвищувальних трансформаторів електричної станції. Значить, розглянутий другий контур не є останнім і до справжнього джерела – генераторів електричних станцій – ще повинен бути, як мінімум, один контур. Максимальна частка активної складової спаду напруги в другому контурі доводиться на фіктивний споживач – обмотки ВН трансформатора II. Таким чином, і в даному випадку умовне джерело енергії в першому контурі – трансформатор II – є споживачем в другому контурі. Показана схема тягової підстанції закінчується там, де проходить штрихова лінія (рис. 7). На рис. 7 також показана схема живлення через фідери 9, 10 і рейковий фідер 13 тягової мережі першої колії залізниці. Аналогічним чином через фідери 11, 12 і рейковий фідер 13 живиться тягова мережа другої колії (на схемі не показаний).

Згідно з планами Укрзалізниці основні завдання на найближчу перспективу та на період до 2020 р.:

- розвиток електрифікації;
- проведення модернізації технічних засобів, впровадження нової техніки і технологій, інформаційно-аналітичних та керуючих систем з метою підвищення надійності безпеки руху, енергопостачання та зниження експлуатаційних витрат;
- забезпечення реконструкції та модернізації технічних засобів для впровадження швидкісного руху на окремих дільницях залізниць;
- створення належних та безпечних умов праці;
- проведення реструктуризації господарства в процесі реформування Укрзалізниці.

## 2 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ

Якщо проаналізувати розвиток електричної тяги, можна зробити висновок, що у процесі розвитку вирішувались такі задачі:

- поліпшення енергетичних характеристик і параметрів надійності системи електричної тяги в цілому. З цією метою поряд з класичною системою електричної тяги постійного струму (напруги 750, 1500 і 3000 В) були реалізовані системи змінного струму (спочатку 15 кВ 16 2/3 Гц і потім 25 кВ, 50 Гц), а в даний час розробляється система постійного струму підвищеної напруги, наприклад до 12 кВ. Саме при цьому вирішується завдання підвищення ККД і зниження втрат електроенергії. Значні можливості тут відкриваються завдяки використанню силових напівпровідників, які дозволяють перейти до плавного безреостатного регулювання, реалізувати ефективні системи рекуперативного гальмування, замінити класичний тяговий електродвигун постійного струму на асинхронний безколекторний двигун. Однак, незважаючи на це, слід констатувати, що загальний ККД системи електричної тяги при живленні від теплових електростанцій не перевищує 30 %, а від гідроелектростанцій 50 - 60 %. В електричній тязі змінного струму не вирішені проблеми забезпечення необхідних значень коефіцієнта потужності та коефіцієнта симетрії фаз мережі живлення.

- Удосконалення технічних засобів (електрорухомий склад і електропостачання), головним чином, з метою підвищення реалізованої потужності, в тому числі потужності на вісь і одиничної потужності ЕРС (електровоз, моторний вагон). Підвищена потужність дозволила збільшити вагу поїзда та швидкість сполучення, так що зараз вагова норма вантажних поїздів досягла 6000 т, пасажирських поїздів дальнього сполучення 1200 - 1500 т, що відповідає місткості 800 - 1100 пасажирів, складовою приміських електропоїздів - до 10 - 12 вагонів (1000 - 1300 пасажирів), поїздів метро 6-8 вагонів (до 750 - 900 пасажирів). На швидкісних лініях реалізуються швидкості до 250 - 350 км/год.

- Розвиток систем управління і автоматизації, включаючи системи енергодиспетчерського телеуправління, автоведення поїздів, автоматизована система управління (АСУ) всіх видів – бортові, енергодиспетчерські, деповські.

Аналіз ситуації показує, що, незважаючи на значний прогрес в технічних засобах електричної тяги (е.р.с. і енергопостачання), багато енергетичних проблем виявляються не тільки не вирішеними, але навіть посилюються. Наприклад, масове застосування рекуперативного гальмування, особливо в системі постійного струму, ставить проблему використання електроенергії, яка підлягає поверненню в тягову мережу. Підвищення одиничної (секційної) потужності е.р.с. в моторвагонній електротязі підсилює імпульсний характер споживання потужності, що веде до зростання втрат енергії в системі електропостачання.

Нерівномірність споживання енергії в електричній тязі має тенденцію до посилення, що погіршує її енергетичні та економічні показники, вимагає завищення встановленої потужності всіх видів обладнання в системі електропостачання. Ця проблема вимагає окремого розгляду стосовно до приміського сполучення та метро, де використовують електричну тягу постійного струму.

Система електричної тяги в приміських зонах великих міст характеризується піковими навантаженнями первинної енергосистеми, що пов'язано зі специфічними режимами руху електропоїздів при наявності частих зупинок. Наприклад, на Київщині середня відстань, яку проходять електропоїзди між зупинками, становить біля 3 км. При цьому енергія з контактної мережі зазвичай споживається імпульсами тривалістю до 2 - 3 хв. Оскільки сучасні поїзди мають рекуперативне гальмування, наприклад, електропоїзди EP2P, EP2T, ED2T, ED4, то після імпульсу споживання енергії і проміжку, відповідного режиму вибігу, слідує імпульс віддачі енергії в мережу тривалістю 30 - 60 сек. Наявність в фідерній зоні декількох електропоїздів не дає повного згладжування імпульсного характеру споживання енергії. Доводиться також враховувати можливість накладення імпульсів споживання, причому приблизно з такою ж вірогідністю можуть накладатися один на одне імпульси повернення енергії рекуперації.

Нерівномірність споживання електроенергії ускладнює функціонування первинної енергосистеми. Таким чином, характер споживання енергії відбивається на величині відповідних витрат і в результаті впливає на собівартість перевезень. Нерівномірність енергоспоживання може бути оцінена в різних точках системи електричної тяги – на струмоприймачі поїзда, на фідерах підстанції або на первинній стороні підстанції. Для розрахунків з енергосистемою важлива остання з зазначених точок. Кількісно нерівномірність споживання енергії в цій точці може бути оцінена такими показниками, як пік-фактор або коефіцієнт форми. Для лінії з переважно приміським рухом пік-фактор досягає значень 10 - 15, а коефіцієнт форми 3 - 6. Додаткові труднощі виникають при необхідності пропуску в первинну енергосистему струму рекуперації, для чого випрямні тягові підстанції необхідно обладнати інверторними агрегатами, що веде до зростання капітальних і експлуатаційних витрат. Розв'язання зазначених двох завдань є важливою умовою зниження собівартості приміських перевезень, причому по мірі удосконалення електропоїздів актуальність цих завдань зростає, так як зростає амплітуда енергоспоживання і повернення при зменшенні їх тривалості. Ці завдання найбільш ефективно вирішуються застосуванням накопичувачів енергії, які згладжують споживання енергії рекуперації, повертаючи її в мережу для компенсації піків споживання.

Сучасний рівень техніки дозволяє створювати накопичувачі різних видів: маховикові, індуктивні зі надпровідниковими контурами, конденсаторні, електрохімічні, електрогідролічні. Для цілей електричної тяги накопичувач може бути встановлений в наступних місцях: на поїзді, в середині фідерної зони, на фідерах підстанції. Технічно найбільш просто реалізуються накопичувачі стаціонарного типу, тобто встановлені всередині фідерної зони або на фідерах підстанції. Накопичувач характеризується наступними показниками: максимальна накопичена енергія (енергоємність), потужність прийому-віддачі, втрати енергії при її збереженні, а також за цикл «прийом - зберігання - віддача». Наприклад, є дані, які рекомендують накопичувачі ємністю 7 кВт-год при потужності прийому - віддачі 8-10 МВт. В умовах дії багаторівневого тарифу, коли тариф за

електроенергію залежить від нерівномірності її споживання, застосування накопичувачей дозволяє у 1,4 - 1,9 разів знизити витрати на оплату електроенергії.

Основна мета застосування накопичувачів енергії (НЕ) в електроенергетичних системах полягає в згладжуванні нерівномірності споживання електроенергії в добовому циклі. Для великих міст, регіонів, промислових центрів характерний графік споживання потужності  $P(t)$  (рис. 2.1) з ранковим і вечірнім піками (РП, ВП); максимальне значення потрібної потужності  $P_{max}$  значно перевищує середню потужність  $P_{cp}$ , так що маємо пік-фактор

$$P_{\phi} = \frac{P_{max}}{P_{cp}} = 1,7 - 2,5.$$

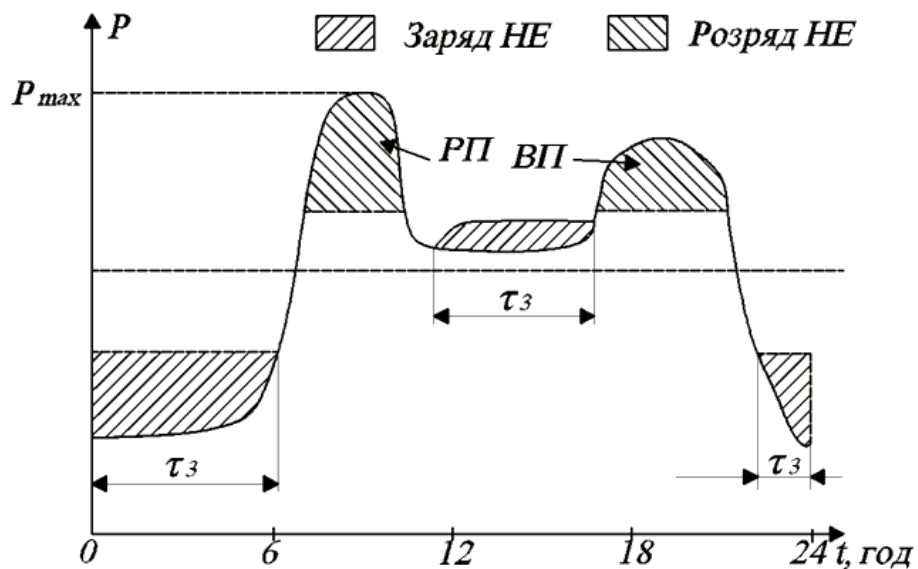


Рисунок 2.1 – Графік споживання потужності  $S(t)$  енергосистеми, що використовує накопичувачі енергії [3]

Функція накопичувача енергії в цій системі полягає в тому, щоб накопичувати енергію в періоди  $t_3$  добового циклу і потім віддавати її на покриття піків РП та ВП. Практично це завдання вирішується за допомогою гідроакumuлюючих енергостанцій (ГЕС), які характеризуються тривалістю процесу заряду  $t_3 = 3 - 5$  год, тривалістю віддачі енергії  $2 - 3$  год, повним ККД циклу  $0,75 - 0,8$ . Необхідно підкреслити, що нерівномірність споживання потужності на електричному транспорті посилюється можливістю віддачі енергії в накопичувачі

при рекуперації. Відповідні практичні розробки зводяться до реалізації таких технічних рішень: електромобіль (або гіробуси), який не має іншого джерела енергії, крім НЕ, що заряджається на стоянці від стаціонарної мережі та який підзаряджається при гальмуванні; гібридний автомобіль (або тепловоз) з двигуном внутрішнього згоряння і НЕ; система електричної тяги, в якій використані стаціонарні або бортові НЕ. Цей варіант дуже перспективний, але, на даний час теоретично опрацьований слабо.

Оцінка додаткових втрат від нерівномірності споживання електроенергії в електричній тязі. Електрична тяга, широко застосовувана на залізничному і міському транспорті, може розглядатися як специфічна електроенергетична система з рухомими навантаженнями. Вона, як правило, характеризується значно більш несприятливими значеннями показників нерівномірності електроспоживання, тобто високими значеннями пік-фактора і коефіцієнта форми, ніж стаціонарні електроенергетичні споживачі. Інша особливість визначається застосуванням рекуперативного гальмування, тобто гальмування з поверненням електроенергії в тягову мережу. На рисунку 2.2 показаний характерний графік споживання-віддачі струму  $I$  і потужності  $P$  для електропоїзда; тут видно чіткі періоди споживання і віддачі енергії, а також безструмові проміжки, які відповідають руху на вибігу і стоянці. Наявність імпульсів повернення електроенергії, з одного боку, забезпечує енергозбереження, але, з іншого боку, це сильно погіршує енергетичні показники системи, зокрема пік-фактор і коефіцієнт форми. Крім того, виникає чисто технічне ускладнення, пов'язане з тим, що в більшості випадків йдеться про електричну тягу постійного струму (рис. 2.2), коли тягова підстанція ТПС виконана з діодним випрямним агрегатом ВА, який не може забезпечити пропуск струму від тягової мережі в первинну енергосистему.

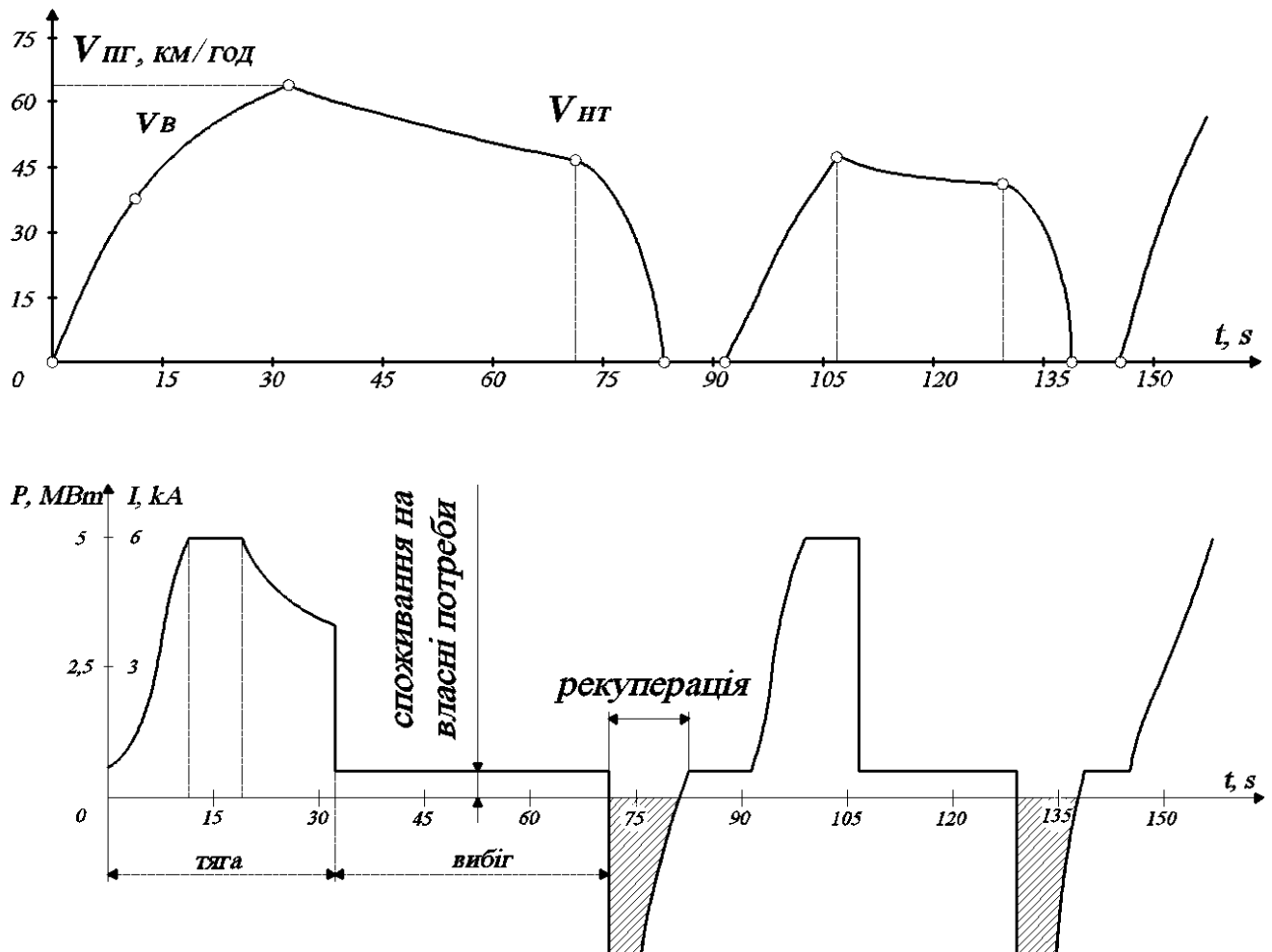


Рисунок 2.2 – Графік споживання-віддачі струму  $I_a$  потужності  $P$  для електропоїзда [4]

Таким чином, при введенні рекуперації можливі наступні варіанти:

- придатна для регенерації в тягову мережу електрорухомим складом енергія може поглинатися тільки іншими поїздами, які працюють в тяговому режимі, а при наявності надлишкової енергії вона гаситься безпосередньо на поїзді (реостатне гальмування) або на тяговій підстанції (стаціонарний пристрій гасіння надлишкової енергії рекуперації);

- тягові підстанції дообладнуються інверторними агрегатами ІА, причому ІА може бути поєднаний з випрямним агрегатом (ВА);

- в системі застосовуються накопичувачі енергії НЕ, енергоємність яких повинна бути розрахована на поглинання енергії рекуперації, причому накопичувачі можуть бути встановлені на фідерах тягової підстанції, в середині фідерної зони, а також безпосередньо на поїзді.



З енергетичної точки зору ідеальна установка накопичувачів на поїзді [5], але на даний час це складніше реалізувати технічно, тому як альтернативний варіант розглядаються стаціонарні накопичувачі. Стаціонарний накопичувач не впливає на потоки енергії в тяговій мережі, але вирішує задачу згладжування енергоспоживання для тягової підстанції та первинної енергосистеми, а також забезпечує можливість застосування рекуперативного гальмування на поїздах. Є два варіанти установки стаціонарних накопичувачів: на фідерах тягової підстанції або в середині фідерної зони, тобто на посту секціонування. Для метрополітену, де підстанції, що живлять тягову мережу, жорстко прив'язані до станцій, тобто пунктів зупинок, поблизу яких реалізуються режими розгону і гальмування електропоїздів, накопичувач повинен бути встановлений на фідерах підстанції. Його ємність повинна дорівнювати подвійному значенню енергії, що рекуперується при гальмуванні електропоїздом від розрахункової швидкості, причому подвоєння пояснюється можливістю одночасного гальмування двох поїздів, що прибувають на станцію з протилежних напрямків. В умовах наземного залізничного транспорту, зокрема в системі приміських сполучень, розміщення тягових підстанцій не пов'язане з пунктами зупинок і, крім того, в залежності від реалізуемого графіка руху в фідерній зоні кожної тягової підстанції може перебувати кілька одночасно гальмуючих поїздів. Тому задача вибору ємності накопичувача може вирішуватися шляхом статистичного аналізу. Тут в результаті аналізу та моделювання може бути отримана залежність між енергоємністю накопичувача  $E_n$  і величиною надлишкової енергії рекуперації  $E_p$ . Під надлишковою енергією розуміють той надлишок рекуперуємої усіма поїздами за добу електроенергії, який не може бути прийнятий системою електропостачання та його гасять переходом на реостатне гальмування. Причому вибір ємності накопичувача в цьому випадку роблять із умови економічної доцільності, зіставляючи капітальні витрати на накопичувач і одержувану при цьому економію електроенергії, за наведеними витратами, що дозволяє вибрати оптимальну енергоємність  $E_{n,опт}$ . Як вже зазначалося, оцінка нерівномірності електроспоживання в електричній тязі може бути виконана методом статистичного

моделювання. При цьому в якості вихідних доцільно прийняти статистичні оцінки, які характеризують типову діаграму руху поїзда приміського сполучення або метро, яка показана на рисунку 2.3 для простішого випадку без рекуперації. У цій діаграмі виділена стандартна для електропоїздів залежність струмоспоживання від часу  $I(t)$ .

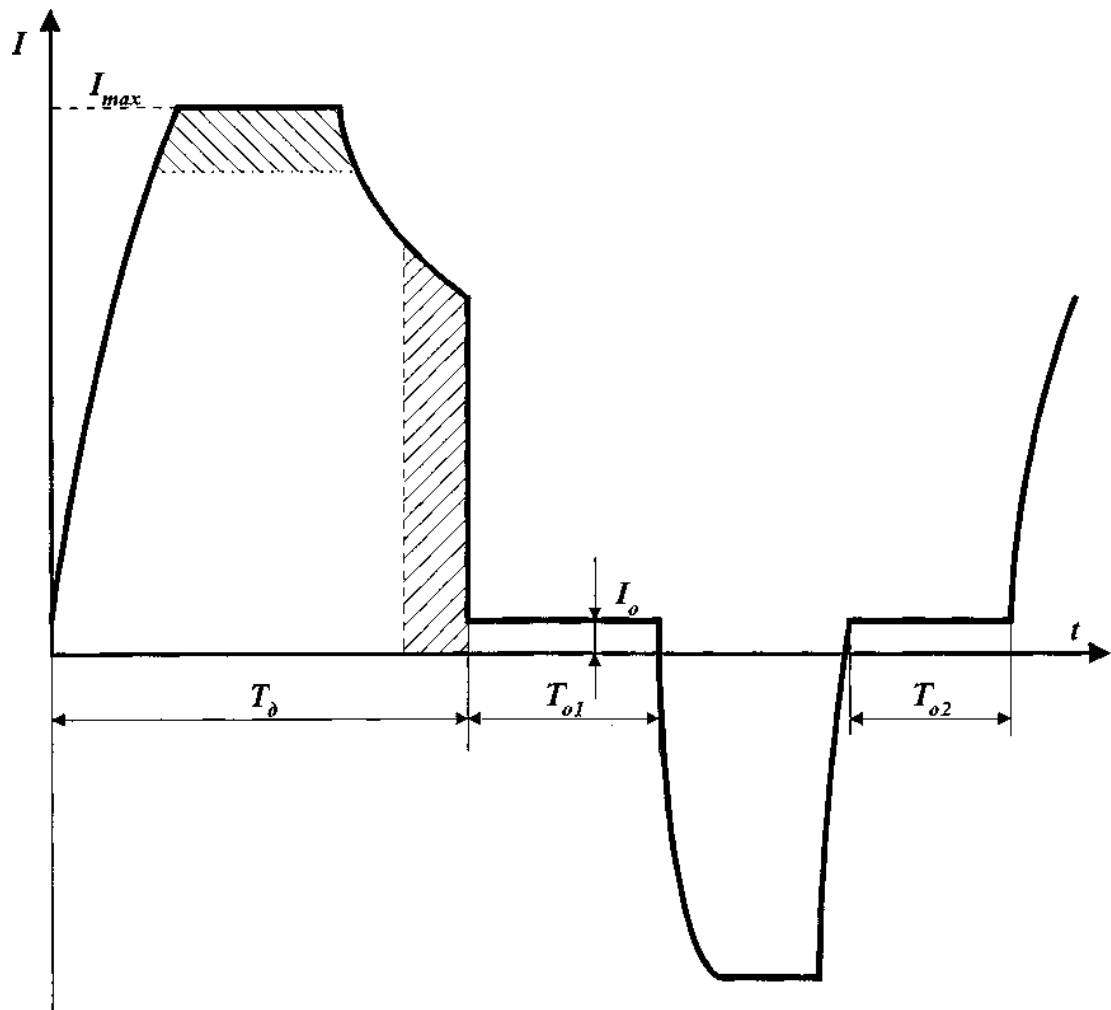


Рисунок 2.3 – Діаграма руху поїздів приміського сполучення [3]

Змінними параметрами за один характерний цикл руху тут є:

- тривалість роботи  $T_d$  тягових двигунів у включеному стані;
- тривалість  $T_0$  відключеного стану тягових двигунів (вибіг, гальмування без включення тягових двигунів в генераторному режимі, зупинка);

- амплітуда пускового струму  $I_{max}$ , яка в сучасних поїздах регулюється машиністом або автоматично. Наприклад, на поїздах EP2T, ED2T, ED4 є 7 уставок  $I_{max}$ ;

- амплітуда струму  $I_m$  споживаного при відключених тягових двигунах (істотно залежить від включення електроопалення і т.д.). Зазвичай  $I_m = 5 - 8$  А в літньому режимі і  $I_m = 20 - 35$  А у зимовому режимі для секції (М + П) приміського електропоїзда постійного струму.

На підставі результатів проведених спеціалістами оцінок у якості прикладу можна показати статистичні розподіли розглядуваних параметрів (рис. 2.4).

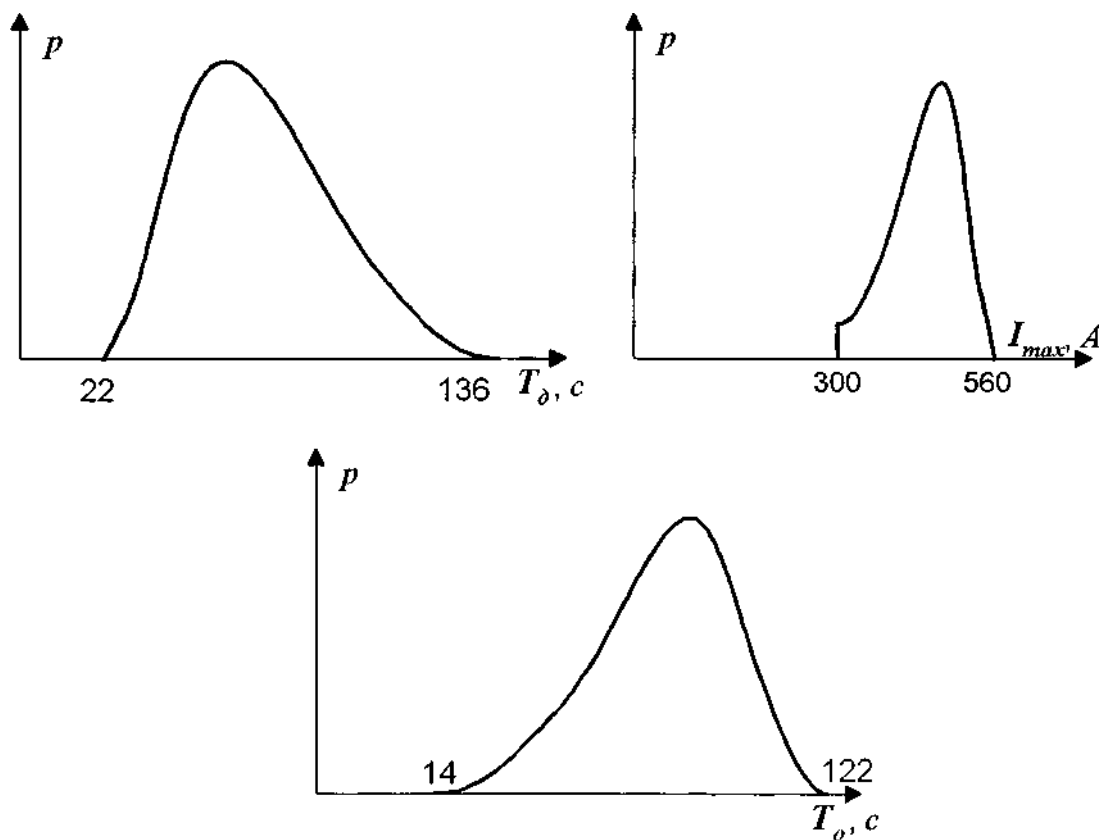


Рисунок 2.4 – Статистичні розподіли характеризують рух приміських поїздів [3]

Нерівномірність навантаження тягової мережі, підстанцій, первинної енергосистеми.

Методом статистичного моделювання можна визначити для кожного з компонентів системи електричної тяги (рис. 2.5) діаграму  $I(t)$ .

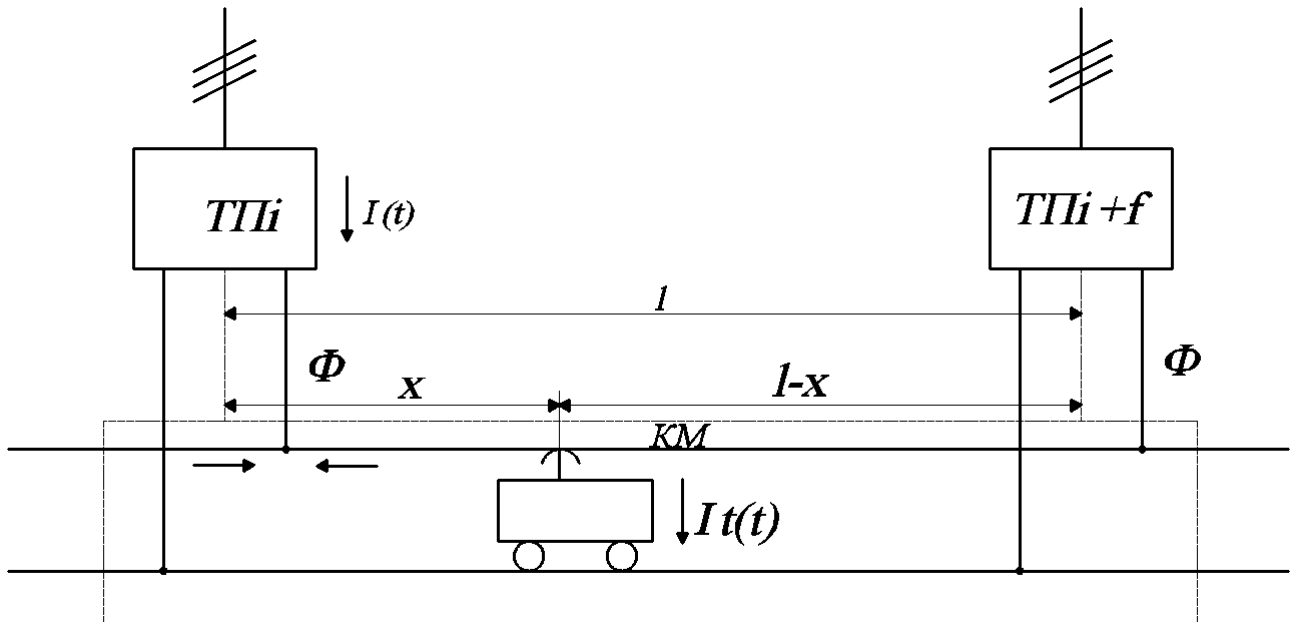


Рисунок 2.5 – Компоненти системи електричної тяги [4]

При цьому вихідною є відповідна діаграма кожного окремого поїзда  $I_i(t)$ . У тяговій мережі ці діаграми  $I_i(t)$  від декількох поїздів накладаються, але по різних ділянках тягової мережі це накладення відбувається по-різному в залежності від конкретного розміщення електропоїздів.

В обладнанні підстанцій, тобто на залізницях постійного струму в трансформаторно-випрямному агрегаті, також відбувається накладення струмів від різних поїздів. Однак, тут потрібно враховувати такі моменти:

- в агрегаті підстанції підсумовуються навантаження з усіх прилеглих ділянок тягової мережі, тобто на двоколінійній лінії з 4-х ділянок;

- оскільки в більшості випадків використовують 2-стороннє живлення, то струмові навантаження на тягову мережу від окремих поїздів розподіляються між сусідніми підстанціями приблизно зворотно пропорційно відстаням  $x$  і  $(l - x)$  від поїзда до сусідніх підстанцій.

Як правило, в тяговій мережі і особливо на підстанції, результуюче навантаження  $I(t)$  має вже безперервний характер; навіть для випадку при імпульсному характері вихідного навантаження від електропоїздів приміського сполучення прийнято розглядати це навантаження в залежності від часу як

стаціонарну ергодичну функцію, що дозволяє уявити її у формі розподілу  $p(I)$ . У роботах [7, 8] показано, що цей розподіл є усіченим нормальним (рисунок 2.6).

Кількісна оцінка нерівномірності споживання потужності та ефективності згладжування її за допомогою накопичувачів енергії. Застосування накопичувачів вимагає введення специфічних кількісних оцінок для розрахунку нерівномірності споживання потужності в транспортній системі. Серед найбільш простих і поширених кількісних оцінок в електроенергетиці є пік-фактор (рис. 2.6, а) та обчислюється, як відношення максимальної потужності  $S_{max}$  до середньої  $S_{cp}$ , причому останню обчислюють шляхом інтегрування кривої споживання потужності у функції часу  $S(t)$  за період усереднення  $T$ , який в електроенергетиці зазвичай приймають рівним добі ( $T = 24$  год). Для тягового електропостачання усереднення доцільно по характерним періодам графіка руху.

$$\Pi = \frac{S_{max}}{S_{cp}} = \frac{S_{max}}{\frac{1}{T} \int_0^T S dt}. \quad (2.1)$$

Ефект згладжування піку енергоспоживання показаний на рисунку 2.6, а, де вихідній кривій споживаної потужності  $S(t)$  відповідає пік-фактор  $\Pi = 1,6$ . Якщо введенням накопичувача енергії зрізати цей пік до значення  $S_n$ , причому  $S_{cp} < S_n < S_{max}$ , забезпечуючи підживлення споживачів на інтервалі часу  $t_1' - t_2'$ , коли  $S > S_n$ , то пік-фактор знижується до значення

$$\Pi = \frac{S_n}{S_{cp}} = 1,24, \quad (2.2)$$

причому для вирішення цього завдання необхідно накопичувач з енергоємністю

$$E_n = \int_{t_1}^{t_2} S(t) dt, \\ E_{n \max} = \int_{t_1}^{t_2} S(t) dt. \quad (2.3)$$

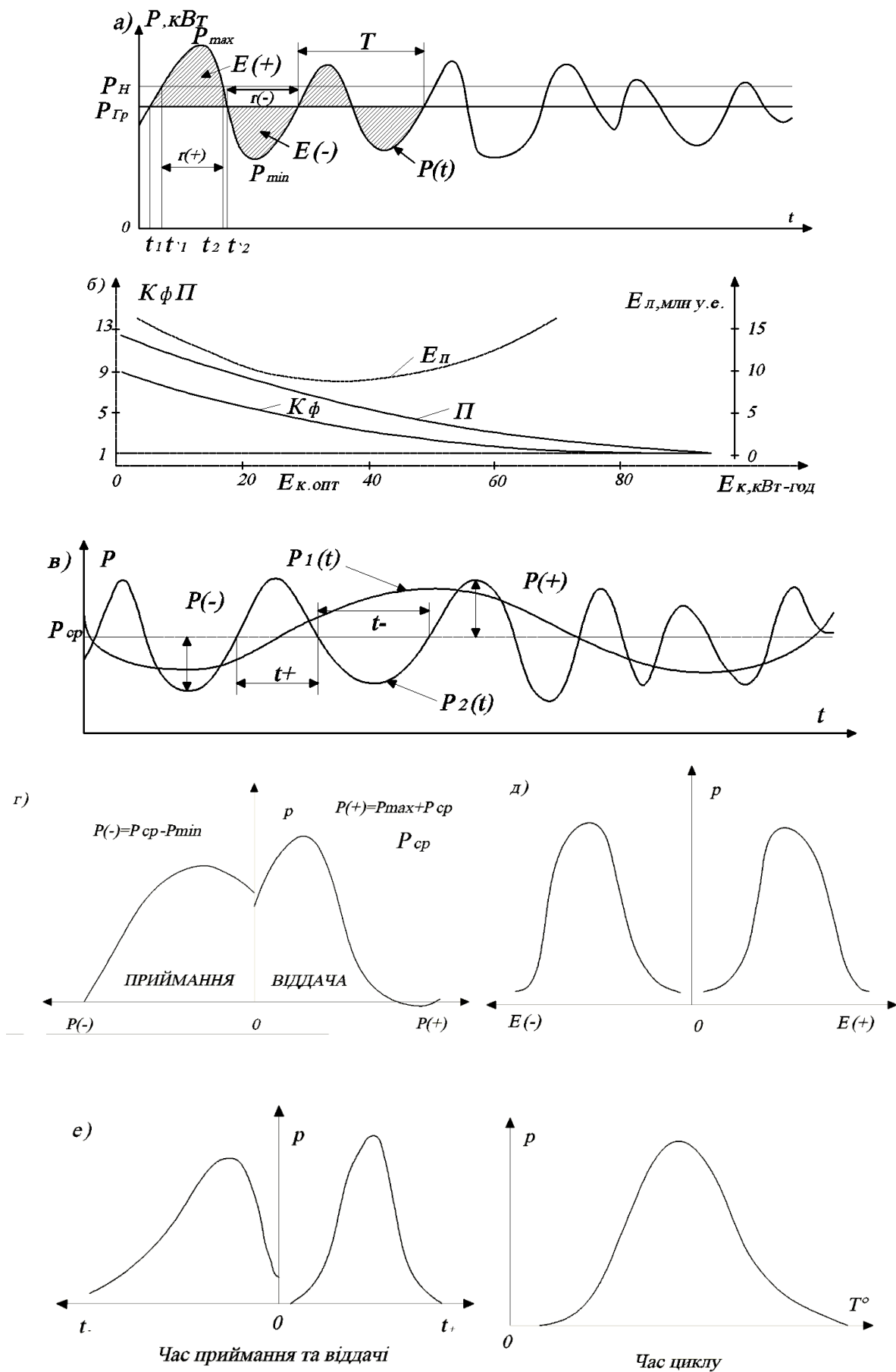


Рисунок 2.6 – Статистичні оцінки прийому і віддачі енергії [5]

В ідеальному випадку бажано, щоб було  $E_n = E_{n\ max}$ , оскільки це забезпечує ідеальне згладжування і дає  $\Pi = 1$ , але зазвичай таке рішення економічно недоцільно через різке підвищення вартості накопичувача. Тому необхідну ємність накопичувача визначають шляхом проведення техніко-економічного обґрунтування, враховуючи, з одного боку, вартість накопичувача, і, з іншого боку, що ним забезпечується позитивним ефект. Останній зводиться до наступних факторів:

- обмеження граничного значення споживаної потужності на економічно доцільному рівні  $S_n < S_{max}$ , оскільки це впливає на величину тарифу по оплаті електроенергії;

- зниження втрат електроенергії в лініях електропередачі та в електрообладнанні підстанцій.

У разі превалюючої дії першого фактора для оцінки нерівномірності енергоспоживання і відповідно ефективності застосування накопичувачів енергії доцільно використовувати пік-фактор (2.1). Якщо ж переважаючим є фактор зниження втрат, то пік-фактор (2.1) перестає бути прийнятною оцінкою і слід спиратися на показники інтегрального типу, наприклад на коефіцієнт форми

$$K_{\phi} = \frac{S}{S_{cp}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T S^2(t) dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt} \quad (2.4)$$

що є відношенням діючого значення потужності до її середнього значення.

Втрати в системі електропостачання можна вважати пропорційними квадрату коефіцієнта форми. Це дозволяє розрахувати залежності показників  $\Pi$  і  $K_{\phi}$  від енергоємності накопичувача  $E_n$ , одночасно оцінивши і приведені витрати  $B_n$ , в яких враховані як капітальні витрати на накопичувач, так і економія експлуатаційних витрат, що досягається при його застосуванні, (рис. 2.6, б). Для конкретної ситуації можуть бути побудовані графіки, які показують залежність показників  $\Pi$  і  $K_{\phi}$  від енергоємності  $E_n$  накопичувача електроенергії. Як вже зазначалося, ідеальний випадок має місце при  $E_n = E_{n\ max}$ , але це технічно і

економічно недоцільно, зважаючи на великі капітальні витрати на накопичувачі. Тому можна орієнтуватися на деякий проміжне значення енергоємності  $E_n < E_{nmax}$ , при якому, як показано на рис. 2.6, б, наведені витрати  $B_n$  мінімальні. Конкретний вид кривих  $\Pi(E_n)$  і  $K_\phi(E_n)$  істотно залежить від характеру споживання потужності, причому в разі, коли функція  $S(t)$  може розглядатися як випадкова функція, ці криві достатньо просто можна отримати шляхом статистичного моделювання на ЕОМ. Таке моделювання може бути виконане на основі вихідних імовірнісних розподілів, що характеризують процес споживання струму або потужності. Розподілу дають статистичні характеристики відхилень від середнього значення потужності. Як приклад на рисунку 2.6, в показані два процеси споживання потужності  $S_1(t)$  і  $S_2(t)$ , які характеризуються приблизно однаковими значеннями середньої потужності та розглянутих показників. Але з точки зору застосування накопичувачів процес 1 менш сприятливий, так як вимагає приблизно вдвічі більше високого значення енергоємності, ніж процес 2. Якщо функцію  $S(t)$  вважати випадковою функцією, що має властивості стаціонарності й ергодичності, то в основу статистичного моделювання можуть бути покладені розподіл ймовірностей для максимумів і мінімумів потужності (рис. 2.6, г), потоків прийому - віддачі енергії в ланцюзі обміну «накопичувач-споживач» (рис. 2.6, д) і тривалості прийому - віддачі  $\tau$  (рис. 2.6, е), а також тривалості циклу  $T$  (рис. 2.6, ж). Можуть бути використані і більш детальні оцінки, пов'язані з автокореляційними залежностями в кривій  $S(t)$ .

Розрахунок електроенергетичної системи з накопичувачем енергії зводиться до того, що за допомогою датчиків випадкових чисел по черзі моделюють значення  $S_{max}$ ,  $S_{min}$  і  $E(+)$ ,  $E(-)$ ,  $\tau$ ,  $T$  і при цьому для попередньо заданої енергоємності накопичувача аналізують ті потоки енергії, що реально приймаються і віддаються, а також наявність енергії в накопичувачі, яке на повинне перевищувати його енергоємності. Ефект оцінюють за реальним розміром кривої  $S(t)$ , підраховуючи для неї показники  $\Pi$  і  $K_\phi$ .

Вплив режиму рекуперації на нерівномірність енергоспоживання і на додаткові втрати. Рекуперація є прогресивним технічним рішенням, тому що



дозволяє повернути в контактну мережу в умовах приміського сполучення і метро до 20 – 25 % електроенергії, споживаної в режимі тяги. Однак, з точки зору нерівномірності споживання, вона суттєво погіршує ситуацію. Так, в діаграмі струмоспоживання поїзда (рис. 2.7) з'являються імпульси зворотного струму тривалістю  $T_p$ , так що потрібно аналізувати 4 характерних інтервали:

- рух з включеними двигунами  $T_B$ ;
- вибіг  $T_0'$ ;
- рекуперація  $T_p$ ;
- догальмування поїзда реостатним або пневматичним гальмом і стоянка  $T_0''$ .

При цьому розподілу  $p(T_B)$  і  $p(T)$  залишаються практично тими ж, як розглянуто вище, а крім того потрібно ввести розподіли  $p(T_0')$ ,  $p(T_p)$  та  $p(T_0'')$ .

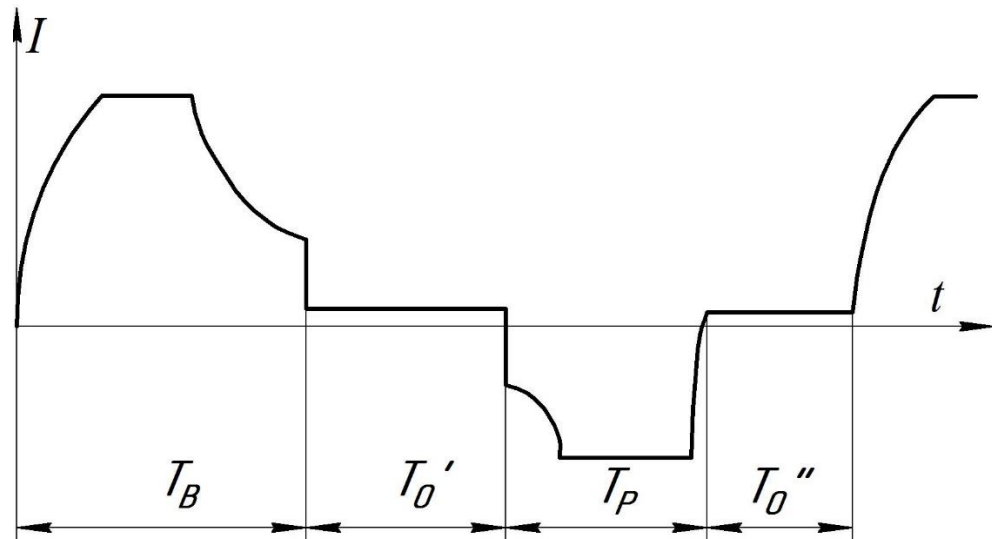


Рисунок 2.7 – Типова діаграма струмоспоживання поїзда приміського сполучення [6]

У разі застосування рекуперації виникає також проблема використання енергії, що підлягає поверненню в тягову мережу. У самому несприятливому випадку може виникати ситуація, коли має місце накладення однойменних піків «споживання – віддачі» енергії.

Додаткові втрати від нерівномірного споживання електроенергії. Втрати електроенергії в тяговій мережі (контактна мережа і рейкові кола), в електрообладнанні тягових підстанцій і в живильних лініях змінного 3-фазного

струму, згідно структурній схемі (рис. 2.8), прийнято називати умовними втратами [5]. Мінімум умовних втрат  $\Delta E_{y \min}$  має місце при незмінному (строго постійному) споживанні струму електрорухомим складом. Цей режим не є характерним для електричної тяги – для неї характерні різко змінні навантаження, в результаті чого в реальній ситуації маємо значне перевищення рівня умовних втрат  $\Delta E_y$  над його мінімальним значенням. Для різних компонентів системи електропостачання це перевищення показано в таблиці 2.1, де наведені коефіцієнти перевищення рівня умовних втрат [9].

$$K_n = \frac{\Delta E_y}{\Delta E_{y \min}}$$

Таблиця 2.1 – Коефіцієнт збільшення частки втрат електроенергії в елементах системи електропостачання постійного струму 3 кВ через нерівномірності споживання струму (2-колійна лінія)

Елемент системи електропостачання	Переважаючий вид руху		
	Приміський	Вантажний	Пасажирський
Тягова мережа	2,4-3,5	1,5-1,8	1,3-1,6
Тягова підстанція та власні ЛЕП	1,8-2,9	1,25-1,45	1,1 - 1,35

Контактна мережа і рейки, що входять в контур протікання струму ЕРС, умовно заміщають опором тягової мережі  $R_{tm}$ . Складність розрахунку умовних втрат визначається саме цим опором, тому що він не постійний через зміни положення е.р.с. по відношенню до тягової підстанції. Цей опір навіть для певного положення е.р.с. складно підрахувати через багатоконтурність живильного кола, де потрібно враховувати двостороннє живлення е.р.с. від суміжних тягових підстанцій, наявність поперечних з'єднань контактних підвісок, протікання струму живлення даного електровоза по контактних підвісках сусідніх колій на двоколієвих і багатоколієвих ділянках.

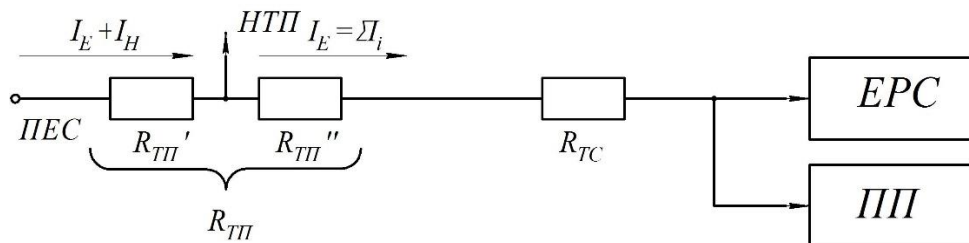
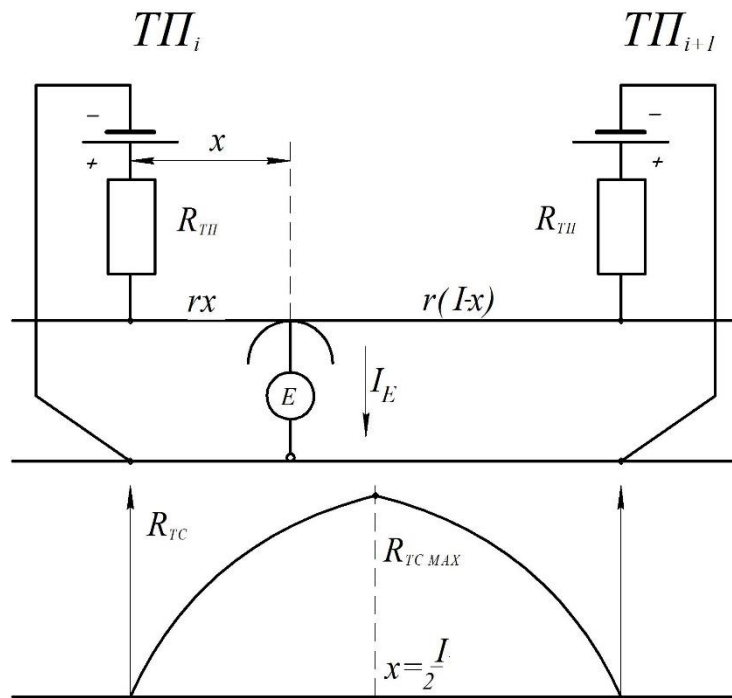
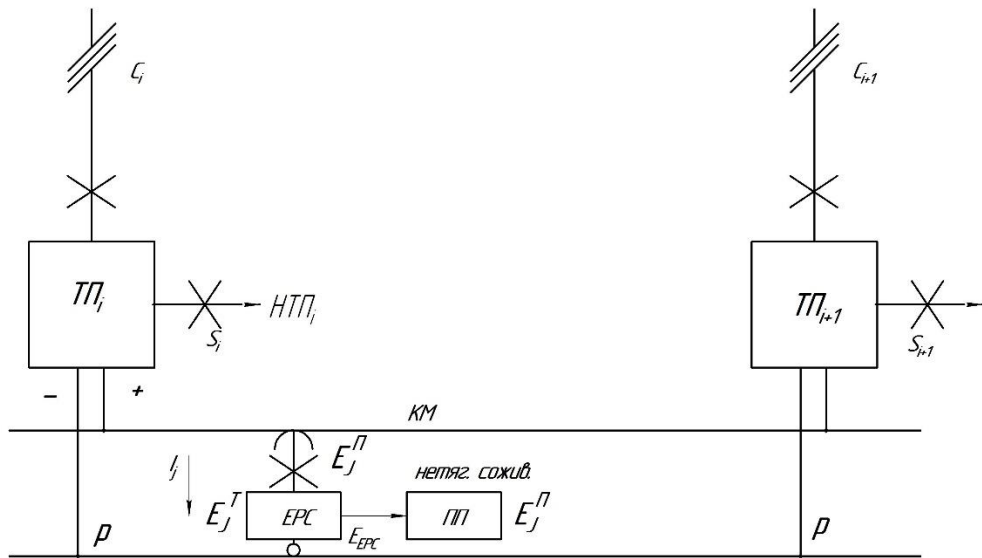
$E_0$ 

Рисунок 2.8 – Структурна схема системи енергопостачання постійного струму та її схеми заміщення [8]

Таким чином, умовні втрати утворюються при протіканні сумарного струму, що споживається електрорухомим складом, по стаціонарних пристроях електропостачання, включаючи тягові підстанції, контурну мережу і рейки. Якщо на тяговій підстанції живлення контактної мережі та нетягових споживачів здійснюється від загального трансформатора, що знижує напругу первинної енергосистеми, то для подальшого розрахунку зручно прийняти схему заміщення по рисунку 2.8, в. У цій схемі тягова підстанція представлена двома послідовно включеними опорами  $R'_{ТП}$  і  $R''_{ТП}$ , причому по першому протікає сумарний струм  $e.p.c.$  і нетягових споживачів, а по другому – тільки струм  $e.p.c.$

### 3 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В СИСТЕМІ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

Для сучасної енергетики велике значення мають вимоги, які ставляться до якісних показників енергетичних установок. У цьому плані зростає роль накопичувачів енергії, які забезпечують вирішення завдань накопичення, зберігання, перетворення і економії енергії. В електричній тязі вони дозволяють реалізувати оптимальні за умовою мінімуму втрат режими роботи тягового обладнання.

Під накопичувачем енергії розуміється пристрій, що дозволяє накопичувати в ньому енергію будь-якого виду протягом періоду заряду  $i$ , а потім, протягом періоду розряду передавати значну частину цієї енергії споживачу [10]. Взаємозв'язок параметрів накопичувача при заряді  $i$  і розряді визначається законом збереження енергії, що виражається співвідношенням енергобалансу

$$\bar{P}_3 t_3 \eta = \bar{P}_p t_p, \quad (3.1)$$

де  $\bar{P}_3$  і  $\bar{P}_p$  – середні значення потужностей зарядного і розрядного процесів;  $\eta$  – ККД накопичувача.

Цей вираз може бути також записаний для миттєвих значень потужності. Значення  $t_3$  і  $t_p$ , а також енергетичні показники  $\eta_3$  і  $\eta_p$  при заряді і розряді можуть сильно відрізнятися і тому існує кілька головних напрямків використання накопичувачів. Їх основна роль може зводитися до акумулювання надлишкової енергії при відключенні значної частини споживачів і подальшого використання накопиченої енергії в періоди інтенсивного енергоспоживання. В такому випадку  $t_3$  і  $t_p$  мають приблизно однаковий порядок, а енергетичні показники при заряді і розряді близькі. Прикладом такого типу накопичувача є гідроакумулююча електростанція, в якій в нічні години надлишкова електроенергія направляється в гідротурбіни, які реалізують накопичення потенційної енергії води, піднятої на необхідну висоту допомогою електродвигунів, що обертають турбоагрегати і

виконують роль насосів, що подають воду в верхній резервуар. У години пік споживання вода з верхнього резервуара опускається в нижній резервуар, забезпечуючи обертання турбоагрегатів в генераторному режимі для отримання додаткової електроенергії на покриття піків.

Накопичувачі можуть використовуватися для поліпшення показників енергосистем при короткочасному включенні споживачів підвищеної потужності, компенсувати пікові навантаження і покращувати стійкість роботи енергоустановок і систем електроживлення. В такому випадку вони є демпферувальними елементами між генеруючими установками в первинній мережі і споживачами, які працюють в нестационарних режимах (для електричної тяги такими споживачами є поїзди, які споживають електроенергію з тягової мережі).

Інше призначення накопичувачів – перетворення енергії. Такого типу накопичувачем є енергоустановки космічного апарату з електрохімічним генератором, який в режимі накопичення енергії перетворює електричну енергію від сонячних батарей в хімічну за рахунок розкладання робочої речовини на відповідні компоненти, а на стадії виведення енергії реакція взаємодії цих компонентів створює електричну енергію.

Є також накопичувачі, які у відповідних режимах забезпечують перетворення певних показників певного виду енергії. Якщо в накопичувачі  $t_p \ll t_z$ , то з (3.1) випливає, що  $P_p \gg P_z$ . Тобто потужність, що віддається накопичувачем, перевищує потужність, споживану їм при заряді від первинного джерела енергії – накопичувач діє як трансформатор потужності. Накопичувачем такого типу є ємнісний накопичувач, що дозволяє виводити на додачу струми значно більші, ніж при його заряді. В індуктивному накопичувачі за рахунок ЕРС самоіндукції виникають напруги, що значно перевищують напруги джерела живлення. Механічні накопичувачі енергії допускають взаємне перетворення кінетичної і потенційної енергії.

Деякі типи накопичувачів можуть працювати в режимі відносно тривалого зберігання енергії (хімічні, механічні та ін.). Кожен з цих типів має свої специфічні особливості, тому їх проектування та використання є досить різноманітним завданням.

Для паливних елементів (хімічних джерел) і акумуляторних батарей головні технічні проблеми – це забезпечення оптимальних фізико-хімічних реакцій, а також вирішення технологічних і матеріалознавчих задач.

Індуктивні накопичувачі розглядається з урахуванням електромагнітних процесів, геометрії котушок, міцності, теплових режимів. Застосування ємнісних накопичувачів – це необхідність вирішення проблем оптимальних режимів заряду конденсаторів і узгодження характеристик систем з накопичувачами в динамічних режимах. При вивченні накопичувачів магнітної і електричної енергії особливе значення набувають питання комутації ланцюгів при великих струмах і напругах, яка не може забезпечуватися типовою апаратурою і необхідна розробка спеціальних замикачів і розмикачів.

Аналіз механічних накопичувачів пов'язаний з питаннями динаміки механічних процесів і міцності, а для електромеханічних і електродинамічних накопичувачів не менше значення відводиться електричним перехідним процесам і тепловим режимам.

Для всіх типів накопичувачів необхідне узгодження їх характеристик з параметрами джерел енергії, навантажувальних елементів, комутаційної апаратури і т.п. Значення основних параметрів, що визначають властивості основних типів накопичувачів енергії, наведені в таблиці 3.1.

На рисунку 3.1 показані деякі вибрані типи накопичувачів, причому для порівняння ефективності їх застосування на цьому рисунку наведені питомі енергії (співвідношення накопиченої енергії до маси накопичувача) і питомі потужності (співвідношення потужності заряду/розряду до маси накопичувача).

Таблиця 3.1 – Характерні показники накопичувачів енергії [10]

Накопичувач		Питома енергія, Дж/г	Час виводу енергії, с
З статичною активною зоною	Хімічний	$10^2 - 10^5$	$1 - 10^5$
	Індуктивний	$1 - 10$	$10^{-3} - 10$
	Ємнісний	$0,1 - 0,5$	$10^{-6} - 10^{-2}$
З динамічною активною зоною	Механічний	$10 - 10^3$	$1 - 10^3$
	Електромеханічний	$1 - 10$	$10^{-2} - 10$
	Електродинамічний	$0,05 - 1$	$10^{-3} - 10^{-2}$

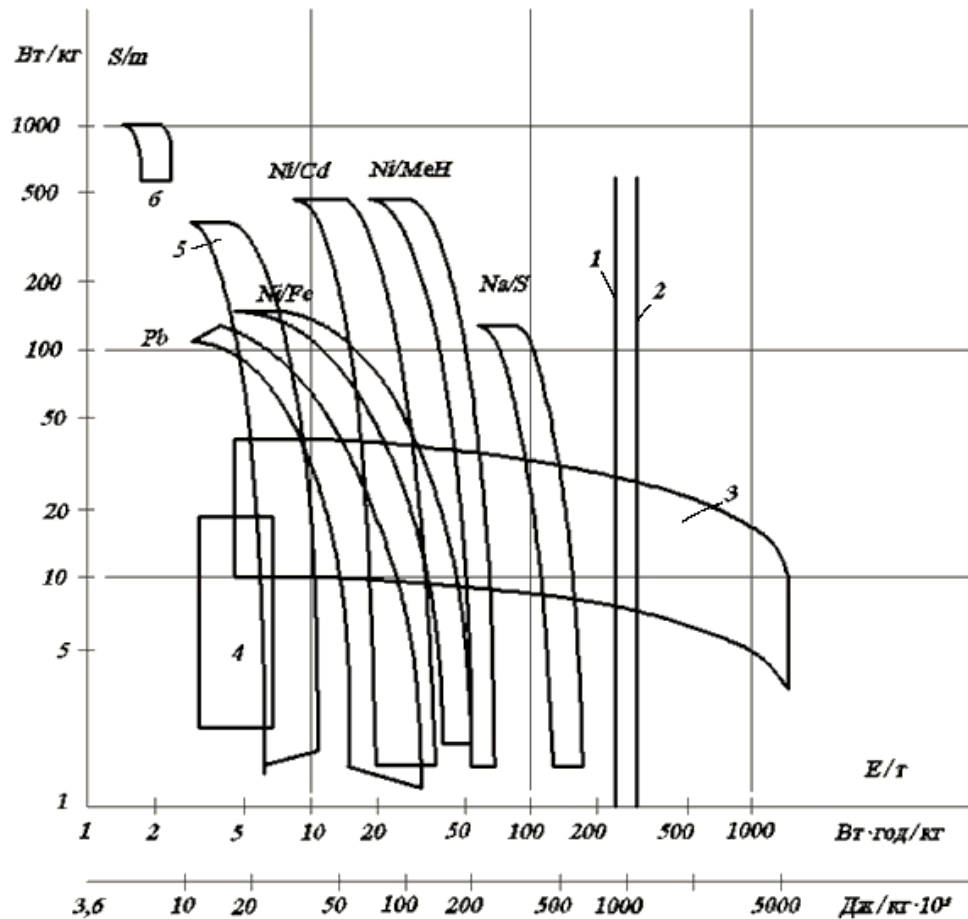


Рисунок 3.1 – Характерні показники накопичувачів енергії [10]

На рисунку 3.1 позначено:

Pb – свинцевий акумулятор;

Ni/Fe – нікель-залізний акумулятор;

Ni/Cd - нікель-кадмієвий акумулятор;

Ni/MeH – нікель-гідриднометалевий акумулятор;

Na/S – сірчано-натрієвий акумулятор;

1 – маховик ободного типу із склопласту;

2 – маховик комбінованого типу (матеріал стрижнів – органопласт, матеріал ободу – скловолокно);

3 – ЕХГ – електрохімічні генератори;

4 – ПАТ – повітряні акумулятори тиску;

5 – МН – моховинні накопичувачі;

6 – ЄМН – ємнісні молекулярні накопичувачі



### 3.1 Накопичувачі, що використовують джерела газу

У якості накопичувачів енергії можуть використовуватися джерела газу з пневмодвигунами, в якості яких зазвичай застосовуються високоперепадні газові турбіни, які є найбільш компактними машинами для перетворення кінетичної енергії газового потоку в механічну.

Основною частиною цих систем є джерела енергії, що підрозділяються на дві групи: джерела холодного газу; джерела гарячого газу. З джерел холодного газу найбільшого поширення набули балони стисненого газу, що мають форму кулі, циліндра, тора та ін. Внутрішній робочий тиск в балонах зазвичай становить  $(250 - 500) \cdot 10^6$  Па. При цьому баковий коефіцієнт балона (відношення роботи газу до сумарної масі балона і газу) становить  $(2 - 3) \cdot 10^4$  Дж/кг [11].

Головні переваги систем на стиснутому газі – це їх конструктивна простота, стабільність характеристик робочого тіла, пожежна безпека, мобільність, простота обслуговування і контролю робочих параметрів. До їх основних недоліків відносяться дуже низькі значення питомої енергоємності, які можуть бути поліпшені використанням стисненого газу для отримання гарячих газоподібних продуктів (спалювання палива, підігрів газу в рекуператорах і т.д.).

### 3.2 Електрохімічні накопичувачі енергії

Електрохімічні накопичувачі енергії (ЕХН) запасують і віддають енергію внаслідок оборотних хімічних реакцій. До цієї групи накопичувачів відносяться:

- електрохімічні генератори (ЕХГ), тобто два або більше паливних елемента (ПЕ) разом з системами, що забезпечують їх роботу;
- хімічні акумуляторні батареї (АБ), тобто хімічні джерела струму, що складаються з двох або більше акумуляторів, з'єднаних електрично між собою для спільного виробництва електроенергії.

Паливний елемент – хімічне джерело струму, в якому активні речовини надходять до електродів ззовні; він є прямим перетворювачем хімічної енергії в електричну. Реакція електрохімічного окислення протікає в ПЕ без витрати

речовини електродів і без витрати електроліту. Вихідні реагенти – це компоненти хімічного палива – пальне і окислювач, з запасом енергії хімічних зв'язків, яка перетворюється в енергію постійного електричного струму. У режимі заряду електроенергія, підведена до ПЕ, перетворюється в хімічну енергію компонентів палива.

Акумулятор – хімічне джерело струму, що складається з одного гальванічного елемента. В акумуляторі відбувається перетворення електричної енергії в хімічну, а потім зворотнє перетворення хімічної енергії в електричну при зміні складу речовини електродів і витраті електроліту в процесі струмоутворювальної реакції.

Для ЕХН основними режимами роботи є заряд і розряд. Режим зберігання енергії – проміжний, його тривалість буває набагато більше, ніж у інших типів накопичувачів (близько  $10^4$  год.).

В ЕХН у якості зарядної потужності  $S_3$ , приймається середня потужність, витрачена на отримання пального і окислювача (наприклад, водню і кисню при електролізі води). Значення  $S_3$  для АБ визначається середньою потужністю, споживаної батареєю від джерела живлення за час заряду. Для ЕХН, виконаних на основі ПЕ або акумуляторних елементів, розрядної потужністю  $S_p$  є потужність, що надходить від накопичувача в ланцюг навантаження.

Електрохімічні генератори. Природні органічні горючі (газ, нафта, вугілля) можна розглядати як накопичувачі хімічної енергії. У цих паливах у якості окислювача зазвичай застосовують атмосферний кисень. Тому для них питому енергію  $E_{\text{пит}}$  оцінюють в розрахунку на 1 кг маси власного пального;  $E_{\text{пит}}$  для його кращих природних сортів досягає значення  $E_{\text{пит}} = 4,5 \cdot 10^4$  кДж/кг [10]. До загальної маси палива в автономних енергетичних установках треба додавати також масу окислювача. Вибираючи для ЕХГ різні робочі тіла, розглядають і зіставляють: питому енергію, властивості продуктів реакції, вартість, агрегатний стан (газ, рідина або тверде тіло) і пов'язану з ним відносну масу контейнерів або балонів для зберігання реагентів, можливість їх безперервного підведення до електродів при регулюванні інтенсивності, а також швидкість електрохімічного взаємодії при

наявності каталізаторів для заданих діапазонів температури і тиску. Зазвичай в якості пального застосовують водень і гідразин у зв'язку з їх високою хімічною активністю, легкістю підведення і відведення продуктів реакції, високою питомою енергією. Відомі ЕХГ, що використовують вуглеводневі горючі (метан, пропан), а також відносно дешеві метанол і аміак. Перспективні напівпаливні елементи з підведенням тільки окислювача на основі вбудованого в елемент твердотілого пального (металів Zn, Al, Mg, Li та ін.) [10]. У якості пального можуть бути також використані токсичні речовини, наприклад, чадний газ CO, гідразин, аміак, галогени і т.п. У якості окислювача зазвичай застосовується кисень, іноді перекис водню, азотна кислота, галогени. Водень-кисневі ЕХГ знайшли використання в особливості для автономних об'єктів, оскільки їх реагенти не токсичні, а кінцевий продукт реакцій таких ЕХГ – екологічно чисті пари води. Після сепарації і очищення від електроліту воду можна використовувати в системах життєзабезпечення автономних об'єктів або вона повторно направляється для отримання вихідних продуктів реакції (водню і кисню) в регенераційних циклах.

Загальною перевагою ЕХГ на ПЕ є відносно високий ККД, порядку 60 - 70 % [10], а також здатність сприймати значні навантаження, безшумність роботи, відсутність механічно рухомих деталей і частин, що зношуються, нешкідливість (як правило), простота експлуатації, надійність функціонування та можливість використання продуктів реакції. Ресурс ЕХГ, який може перевищувати 8 - 10 тис. год. визначається запасом компонентів палива у відкритих циклах або ресурсом допоміжного обладнання в циклах з регенерацією. ЕХГ при середнерозрядній потужності  $P_p = (5 - 200)$  кВт характеризуються питомою енергією  $E_{\text{пит}} = (1.5 - 2) \cdot 10^3$  кДж/кг, обчисленої на одиницю маси ЕХГ, заправленого паливом. Це значення на порядок перевершує значення  $E_{\text{пит}}$  ряду різновидів АБ. Можна розраховувати на створення ЕХН на базі ЕХГ потужністю  $P_p$  до 10 кВт при високих значеннях ККД розряду порядку  $\eta \approx 0,9$  [10].

Недоліки ЕХГ – це складність забезпечення збалансованих електрохімічних реакцій і відносно мала питома потужність  $P_{\text{пит}}$  на одиницю маси – без урахування маси запасу хімічних реагентів в ЕХГ рівень  $P_{\text{пит}} \approx 0,15 - 0,2$  кВт/кг. Для реалізації

збалансованої реакції необхідно забезпечити поділ і дозовану подачу компонентів палива, а також видалення продуктів реакції. ЕХГ чутливі до чистоти хімічних реагентів – навіть невеликі забруднення пального і окислювача істотно знижують ефективність роботи ПЕ. Створення енергоакумулюючих системи на основі ЕХГ – це дорога і складна технічна задача. Відносна вартість потужних електрохімічних генераторів близько 40000 \$/кВт [9].

ЕХГ знайшли застосування в основному для енергозабезпечення автономних установок для космічних програм «Аполлон», «Джеміні», «Скайлеб», «Спейс Шаттл» і ін. Відомі розробки в напрямках застосування ЕХГ для наземних автономних транспортних засобів (наприклад, електромобілів), а також для морських судів і апаратів (батискафів). Діапазон електричних потужностей для різноманітних застосувань ЕХГ – від одиниць до сотень кіловат [10]. Основна відмінність процесу електрохімічного окислення від реакції горіння полягає в тому, що всі стадії хімічної реакції горіння при активному зіткненні молекул в суміші пального та окислювача протікають одночасно у всіх елементарних обсягах робочої області, зайнятої компонентами палива. Стадії сумарної струмоутворюючої реакції також протікають одночасно, але локалізовані в різних областях внутрішнього простору паливних елементів. На відміну від звичайної реакції окислення, яка відбувається з вибухом, наприклад в суміші  $H_2$  і  $O_2$ , електрохімічне окислення в ПЕ є керованим процесом. З урахуванням впливу незворотних електрохімічних процесів в реальних ПЕ питома витрата палива зростає в 1,5 - 2 рази, а питома енергія знижується в 1,5 - 2 рази в порівнянні з відповідними теоретичними показниками.

Розроблено також низькотемпературні (до 373 К) водень-кисневі ПЕ з синтетичними іонообмінними мембранами (ІОМ), що розділяють електроди. Квасітверді матеріали ІОМ – гелі у вигляді фторвуглецевого аналога тефлону.

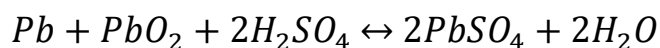
Електрохімічні акумулятори. Принцип роботи акумуляторного елемента полягає в електрохімічній взаємодії двох твердотільних електродів, розміщених в рідкому електроліті, при підключенні зовнішнього ланцюга навантаження до різнополярних електродів. Електроліт бере участь у струмоутворювальній реакції

і служить середовищем для переміщення іонів, які замикають ланцюг струму на внутрішній ділянці акумулятора. Електрохімічні процеси зворотні і тому існує можливість використовувати АБ як багатоциклового накопичувача електроенергії.

Активна маса елементів електродів АБ складається із закріплених на решітці металу і металевого з'єднання. Вона зазвичай зроблена з того ж металу, що від'ємний електрод. Між собою електроди роз'єднані (ізолювані) пластмасовим або полімерним сепаратором. Акумуляторні елементи, залиті розчином електроліту і розташовані в корпусі, мають зовнішні різнополярні електричні виводи і з'єднуються між собою послідовно. Зазвичай корпус АБ забезпечений вентиляційним пристроєм для виходу назовні газоподібних продуктів реакції. Все більшу популярність отримують герметичні конструкції АБ з електролітом, повністю адсорбованим в порах електродів, в яких вентиляційні пристосування непотрібні. При розряді АБ електрохімічна реакція супроводжується перетворенням активних речовин електродів. Заряд АБ при підключенні її до зовнішнього джерела електроенергії супроводжується відновленням хімічного складу активних речовин електродів.

Обмін електричними зарядами між електродами при розімкнутому зовнішньому колі не відбувається, або відбувається тільки в обмеженій мірі. На межі електрод - електроліт, відбуваються реакції окислення і відновлення хімічних речовин з віддачею електронів і утворенням іонів. Нестача електронів на одному електроді приводить до появи на ньому позитивного заряду, надлишок електронів на іншому електроді веде до його від'ємності заряду. Різниця електричних потенціалів електродів при розімкнутому ланцюзі навантаження дорівнює ЕРС АБ, при навантаженні вона менше зазначеної ЕРС.

Найпоширеніші відносно дешеві свинцево-кислотні АБ. Вони досить довговічні (близько 500 допустимих повних циклів «заряд-розряд»), але мають порівняно низьку питому енергію  $E_{\text{пит}} < 120$  кДж/кг [11]. Позитивний електрод виготовлений з двоокису свинцю, анод – з губчатого свинцю. Електролітом служить водний розчин сірчаної кислоти. Стехіометричне рівняння результуючої реакції в цій АБ має вигляд:



причому при заряді реакція відбувається справа наліво, а при розряді зліва направо.

Досить широко поширені також лужні нікель-залізні і нікель-кадмієві АБ, для яких  $E_{\text{пит}} < 180$  кДж/кг. Нікель-кадмієві АБ істотно довговічніше, ніж свинцево-кислотні.

Розроблено також лужні срібно-цинкові АБ. Вони перевершують свинцево-кислотні за питомою енергією приблизно в 2 - 2,5 рази ( $E_{\text{пит}} = 300 - 400$  кДж/кг), але вони значно дорожче. Ці АБ характеризуються порівняно невеликим числом циклів «заряд - розряд», але малими втратами потужності при високій швидкості розряду. ККД їх зарядно-розрядного циклу досягає значення 0,75. Особливі вимоги пред'являються до їх тришарового сепаратора, що розділяє електроди, оскільки ці АБ схильні до саморозряду. Срібно-цинкові АБ призначені для експлуатації в умовах короткочасних режимів розряду великими струмами і тому в їх конструкції застосовані заходи для зниження, приблизно до  $10^{-2}$  Ом, внутрішнього опору. Конструктивною різновидом срібноцинкових АБ є наливні батареї, які призначені для експлуатації при тривалому зберіганні в сухозарядженому стані і не потребують додаткового багатогодинного формування перед введенням в дію.

В останні роки проведено розробки нових АБ на основі акумуляторних елементів з використанням нікелю, сірки, натрію, літію [12 - 15]. Нікель-цинкові лужні АБ забезпечують питому енергію  $E_{\text{пит}} > 200$  кДж/кг, але їх довговічність мала. Підвищення довговічності досягається в газодифузійних нікель-водневих АБ, де  $E_{\text{пит}} > 250$  кДж/кг. Більш високий показник  $E_{\text{пит}} > 500$  кДж/кг мають сірчано-натрієві АБ, але їх ресурс становить лише 100 - 200 циклів «заряд - розряд».

Розроблено також сірчано-натрієві акумулятори з електродами пористої структури. В порожнисті комірки, які виконані з кераміки і електрично з'єднані між собою, заливаються в рідкому вигляді натрій і сірка. Акумулятор допускає до 1000 зарядно-розрядних циклів. Головним недоліком сірчано-натрієвої АБ є велика тривалість заряду, що досягає 7 год. Планується серійний випуск сірчано-натрієвих акумуляторів для застосування в електромобілях протягом найближчих років. Один комплект акумуляторів, встановлений на електромобілі, розрахований

на його сумарний пробіг до 200 тис. км з періодичною підзарядкою, після чого акумулятори необхідно замінювати.

Значне підвищення питомої енергії (теоретично до значень  $E_{\text{пит}} \sim 9000$  кДж/кг) можливо в літієвих АБ, які, проте, характеризуються невеликим ресурсом. Такі АБ мають  $E_{\text{пит}} \sim 560$  кДж/кг,  $t_{\text{роб}} \sim 700$  К, ККД  $\sim 0.7 - 0.8$ , ресурс до 700 циклів «заряд-розряд». Ці АБ виконуються в герметичній конструкції [14].

Для енергозабезпечення суднових установок застосовують спеціальні АБ (на основі хімічних сполук срібла і магнію), що активуються морською водою. Ці АБ мають підвищену питому енергію (до  $E_{\text{пит}} 450$  кДж/кг), але їх вартість більше, ніж у АБ інших типів.

Висока ефективність АБ реалізується при ресурсі їх роботи на рівні 500 - 1000 (і більше) циклів «заряд - розряд», який допускають сучасні конструкції ряду АБ. Акумуляторні батареї застосовують, особливо на транспорті, в системах запуску двигунів (поршневих і газотурбінних), для живлення тягових електродвигунів, в електромобілях, як допоміжні, резервні та аварійні джерела живлення на авіаційних і космічних літальних апаратах, а також в ряді інших пристроїв [12 - 15].

Відомі спроби використовувати АБ у якості накопичувачів енергії в електричній тязі постійного струму [12, 13].

### 3.3 Індуктивні накопичувачі енергії

В індуктивних накопичувачах енергії (ІНЕ) акумулюється енергія магнітного поля. ІНЕ є котушка з індуктивністю  $L$ , по якій тече струм  $i$ . В результаті створюється магнітне поле з енергією  $E = \frac{Li^2}{2}$ .

Енергоустановка з ІНЕ, представлена на рисунку 3.2. Вона крім індуктивної котушки містить джерело живлення ДЖ, комутатори  $K1$  і  $K2$ , навантаження  $H$ .

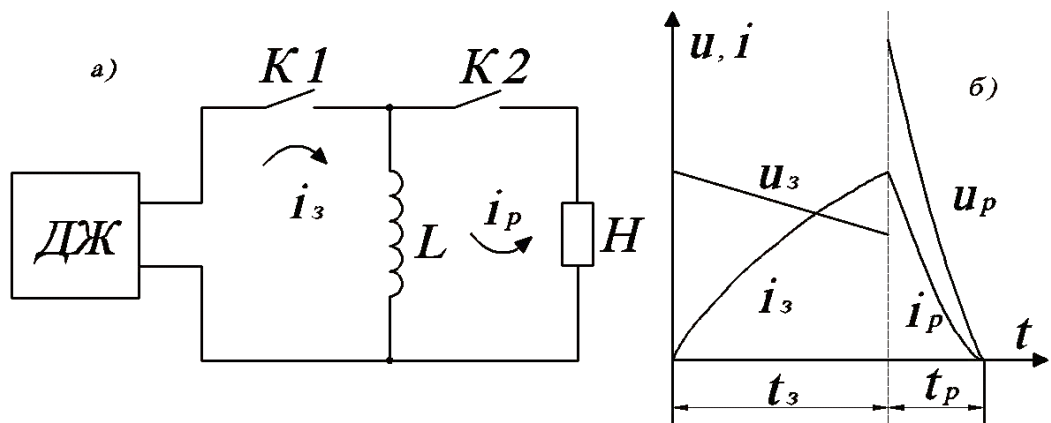


Рисунок 3.2 – Схема установки з індуктивним накопичувачем енергії (а) і характер змін струмів і напруг (б)

При підключенні накопичувача до джерела живлення за допомогою  $K1$  буде реалізований заряд ІНЕ за час  $t_3$ , (рис. 3.2, б). При замиканні комутатора  $K2$  і розмиканні  $K1$  струм ІНЕ тече через навантаження і більшість накопиченої енергії передається приймачеві протягом часу розряду  $t_p$ . Якщо в режимі розряду маємо  $t_p < t_3$ , то потужність ІНЕ при розряді істотно більше потужності зарядного циклу. Тому ІН можна використовувати як трансформатор потужності – він забезпечує короткочасне живлення великою потужністю при розряді після відносно тривалого періоду накопичення енергії (заряду). З моменту замикання  $K2$  і розмикання  $K1$  індуктивний накопичувач можна розглядати як джерело струму, оскільки при його перемиканні на активне навантаження струм в ньому повинен зберігатися безперервним незалежно від структури зовнішньої ланцюга.

Згідно першого закону комутації в момент перемикання комутаторів струм у вітці з індуктивним елементом стрибком змінитися не може, але напруга на затискачах ІНЕ може досягати значень багаторазово перевищуючих напругу джерела живлення. Тому за допомогою ІНЕ можна забезпечити перетворення електричної енергії з підвищенням потужності та напруги.

Перевагою вище наведеної схеми є використання при заряді і розряді тільки одного комутатора, її недоліком – замикання розрядного струму при підвищеній напрузі через ДЖ. Енергію, яку ІНЕ передає навантаженню за один цикл можна за



вирахуванням втрат визначити різницею  $\frac{L(i_{max}^2 - i_{min}^2)}{2}$ . Ця схема раціональна при живленні навантаження з частотами  $f = 1$  Гц і більше [10].

У ІНЕ велику роль відіграють електромагнітні сили і механічні напруги, створювані цими силами, оскільки в ІНЕ протікають значні струми при сильних магнітних полях. Через великі амплітуди струмів першорядне значення має правильне охолодження котушок. Тому аналіз ІНЕ – це спільний розгляд електромагнітних, міцності, конструктивних і теплових процесів з урахуванням характеристик котушок і всіх інших елементів ІНЕ.

Переваги ІНЕ: простота і статичність конструкції, хороші енергетичні і масогабаритні показники, високий рівень енергії, що запасється – більше  $10^5 - 10^6$  Дж, питомої енергії  $5 - 10$  кДж/кг і більше [10], можливість заряду від низьковольтних нерегульованих джерел, висока надійність. Їх недоліки – це необхідність використання швидкодіючих силових комутаторів, великі електродинамічні сили в активній зоні, а також складність системи охолодження.

ІНЕ використовуються для циклічного живлення потужних споживачів електроенергії в електрофізичних установках [14], технологічному обладнанні, автономних електроенергетичних системах і т.п. З'явилися проекти створення потужних ІНЕ в промисловій енергетиці [10]. Планується застосувати ІНЕ в керованому термоядерному синтезі, а також в електродинамічних прискорювачах мас, що дозволяють розганяти об'єкти (літаки, космічні кораблі багаторазового користування) до швидкостей порядку десятків кілометрів в секунду [9, 12].

Індуктивність ІНЕ, що визначає накопичувану енергію, проводиться за відомою формулою:

$$L = \frac{\psi}{i} \quad (3.2)$$

Якщо котушка має  $w$  витків, перетин дроту малий в порівнянні з розмірами витка і розподіл магнітної індукції  $B$  відомий, то магнітний потік для кожного витка складає  $\Phi = \int_S B dS$ , де  $S$  - площа, що охоплюється витком.

Підсумовуючи потоки всіх витків, отримуємо повне потокозчеплення:

$$\psi = \sum_{i=1}^w \Phi_i, \quad (3.3)$$

або, якщо  $\Phi_i = \Phi = const$ , тоді

$$\psi = w\Phi. \quad (3.4)$$

У розрахунках виток умовно розбивають на елементарні трубки зі струмами  $di$  та потоками  $\Phi'$ , зчепленими з кожною з трубок (якщо розміри перетину суцільного витка порівнянні з його габаритами) і знаходять його потокозчеплення у вигляді

$$\psi_0 = \frac{1}{i_0} \int_{i_0} \Phi' di \quad (3.5)$$

де:  $i_0$  - повний струм витка.

Індуктивність цього витка буде

$$L_0 = \frac{1}{i_0^2} \int_{i_0} \Phi' di \quad (3.6)$$

При постійній щільності струму  $di = i_0 \frac{dS}{S}$  ( $S$  – площа поперечного перетину витка) та згідно з (3.5) отримаємо

$$\psi_0 = \frac{1}{S} \int_{i_0} \Phi' dS \quad (3.7)$$

Якщо використовувати котушку з витками, струмом  $I$  та такими ж розмірами, як масивний виток, то, при збереженні повного струму через перетин котушки ( $iw = i_0$ ), магнітна енергія для витка і котушки буде однаковою. Звідси

$$\frac{1}{2} L_0 i_0^2 = \frac{1}{2} Li^2, \quad (3.8)$$

де  $L$  та  $i$  - індуктивність та струм багатовиткової котушки. Значить:

$$L = w^2 L_0. \quad (3.9)$$

Другий метод обчислення індуктивності заснований на використанні формул для безпосереднього визначення  $L$ . Якщо є об'єм  $V$  з однорідними властивостями, по якому тече струм  $i$  з щільністю  $J$ , то за відсутності феромагнетиків індуктивність цього обсягу [10]:

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi i^2} \int_V \int_V \frac{JJ'}{r} dV dV' \quad (3.10)$$

де:  $J$  і  $J'$  - щільності струму в елементах об'єму  $dV$  та  $dV'$ ;  
 $r$  - відстань між центрами  $dV$  та  $dV'$ .

Для реальних котушок коефіцієнт заповнення котушки  $k_3$ , що визначає відношення активної площі перетину всіх провідників до площі перетину котушки; завжди менше одиниці.

Основні типи ІНЕ. Два основних типи ІНЕ – це лінійні накопичувачі, з котушками (витками), що розташовуються навколо прямолінійної осі, і тороїдальні (ІНЕ  $\Theta$ -типу), з котушками (витками), які охоплюють центральну кільцеву лінію. ІНЕ першого типу прості і технологічні, з хорошим використанням активного матеріалу, але вони генерують сильні магнітні поля в навколишньому просторі. Тороїдальні ІНЕ поступаються лінійним по габаритними показниками, їх конструкція складніше, але вони дозволяють усунути зовнішні магнітні поля.

На рисунку 3.3, а показані реальні циліндричні котушки з зазвичай сумірними: осьової довжиною  $l$ , радіальної висотою  $h$  (завтовшки) і середнім діаметром  $d_l$ . Індуктивність такої котушки з  $w$  витками визначає формула:

$$L_{\text{ц}} = \frac{\mu_0}{4\pi} w^2 k_{\phi} d \quad (3.11)$$

де:  $k_{\phi}$  – коефіцієнт, що залежить від відносних розмірів перетину котушки, тобто відношень  $l^* = \frac{l}{d}$ ,  $h^* = \frac{h}{d}$ .

Найбільшою індуктивністю при заданому об'ємі дроту має котушка Брукса [11], у якій  $l^* = h^* = 0,3367$ , або  $l = h = r_1$ , де  $r_1$  - внутрішній радіус (рис. 3.3, б). Тоді:

$$L_B = 8,497 \frac{\mu_0}{4\pi} w^2 d \quad (3.12)$$

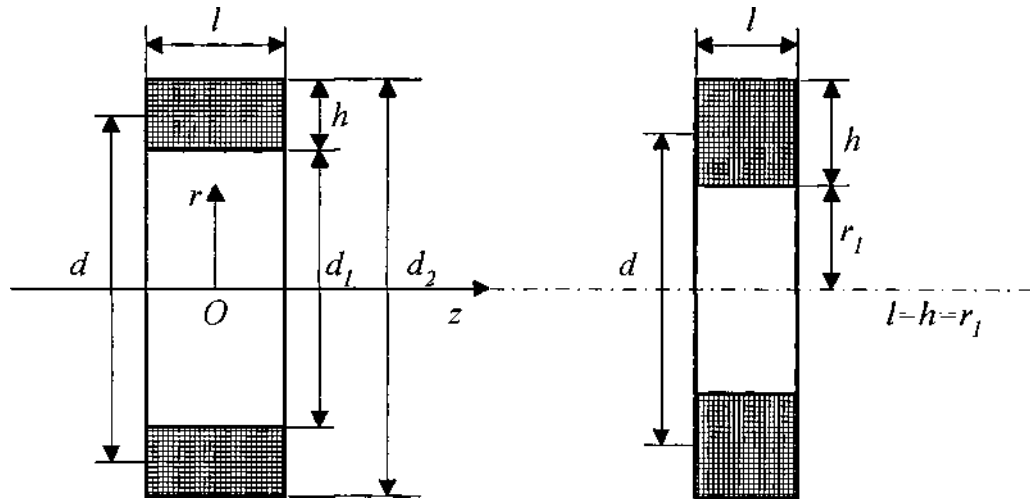


Рисунок 3.3 – Лінійні циліндричні котушки:

а) з прямокутним перетином, б) котушка Брукса

Маючи значення перерізу дроту  $S_{dp}$ , з якого зроблена циліндрична котушка, і задане значення  $L_B$ , можна знайти її розміри за таким виразом:

$$l = h = r_1 = \sqrt[5]{\frac{10^7 L_B S_{dp}^2}{25,49 k_3}} \quad (3.13)$$

де  $k_3$  - коефіцієнт заповнення обмотки котушки.

Рівняння циліндричного ІНЕ, що зв'язує накопичену в ньому енергію, його розміри і допустиму щільність струму в провідниках  $J_u$ , виражається у вигляді

$$E_{ц} = 0,5 L_{ц} i_{ц}^2 = \frac{\mu_0}{8\pi} k_{\phi} (k_3 J_u l^* h^*)^2 d^5 \quad (3.14)$$

Питома енергія ІНЕ (відношення накопиченої енергії до маси циліндричної котушки  $m$ ) має вигляд:

$$E_{\text{пит}} = \frac{E_{\text{ц}}}{m_{\text{ц}}} = \frac{E_{\text{ц}}}{\gamma \pi d^3 k_3 l^* h^*} = \frac{\mu_0}{8\pi^2 \gamma} k_{\phi} k_3 l^* h^* (J_{\text{ц}} d)^2 \quad (3.15)$$

Залежність (3.15) характерна для багатьох типів ІНЕ. Тому застосування ІНЕ тим раціональніше, ніж крупніше ІНЕ і чим більше запасається в ньому енергія. Електричні втрати в котушці визначають за формулою:

$$\Delta S_{\text{втр}} = J_{\text{ц}}^2 \rho \pi k_3 l^* h^* d^3 = J_{\text{ц}}^2 \rho k Q_{\text{ц}} \quad (3.16)$$

де:  $\rho$  – питомий опір матеріалу дроту,

$Q_{\text{ц}}$  – об'єм активного дроту котушки.

Магнітна індукція на осі в центрі котушки (точка  $O$  на рис. 3.3, а) дорівнює

$$B_0 = 0,5 \mu_0 k_3 J_{\text{ц}} d l^* \ln \left( \frac{1+h^* + \sqrt{(1+h^*)^2 + l^{*2}}}{1-h^* + \sqrt{(1+h^*)^2 + l^{*2}}} \right) \quad (3.17)$$

Визначення значення  $B_0$  для заданих розмірів і щільності струму, дозволяє оцінити максимальну магнітну індукцію в котушці  $B_{\text{max}}$ . За  $B_{\text{max}}$  визначають максимальну об'ємну електромагнітну силу  $F_{\text{max}} = J \cdot B_{\text{max}}$ , діючу в котушці.

Для надпровідникових котушок максимальні значення індукції не повинні перевищувати критичної індукції, що порушує надпровідний стан дроту [14]. На розрахунок циліндричних ІНЕ можуть накладатися обмеження на індукцію  $B_0$  з умови допустимих зовнішніх магнітних полів, згасаючих приблизно пропорційно  $B_0/R^3$ . Це веде до необхідності знижувати значення  $J_{\text{ц}}$  обернено пропорційно до збільшення діаметра  $d$ . Подібне обмеження часто виникає і при розрахунку ІНЕ на граничні питомі розтягуючі механічні напруження обмотки. З огляду на (3.14), отримуємо висновок, що накопичена енергія ІНЕ буде пропорційна  $d^3$  [10]:

$$E_{\text{ц}} = \frac{k_{\phi} B_0^2 h^{*2} d^3}{2\pi\mu_0} \left[ \ln \frac{1+h^* + \sqrt{(1+h^*)^2 + l^{*2}}}{1-h^* + \sqrt{(1+h^*)^2 + l^{*2}}} \right]^{-2} \quad (3.18)$$

а питома енергія не залежить від  $d$ :

$$E_{\text{пит}} = \frac{k_{\phi} B_{\text{max}}^2 h^{*2}}{2\pi^2 \mu_0 \gamma k_3 k_B^2 l^*} \left[ \ln \frac{1+h^* + \sqrt{(1+h^*)^2 + l^{*2}}}{1-h^* + \sqrt{(1+h^*)^2 + l^{*2}}} \right]^{-2} \quad (3.19)$$

Енергетичні показники індуктивних накопичувачів на основі тора  $\phi$ -типу можуть наближатися до показників котушки Брукса при однаковій витраті матеріалу [10].

Котушки у вигляді тонкого соленоїда забезпечують хороші умови охолодження провідника (завдяки великій поверхні) і можуть ефективно використовуватися в кріопровідникових ІНЕ, а також в ІНЕ трансформаторного типу. Індуктивність такого соленоїда визначає формула [7]:

$$L_c = 0,5\pi\mu_0 k_{\phi} w_c^2 \left(\frac{d}{l^*}\right) \quad (3.20)$$

Застосовують два типи одношарового соленоїда: навитого з прямокутної шини висотою  $l$ , шириною  $\Delta$  з кроком  $p$  (рис. 3.3, а) і з дроту з круглим перетином діаметра  $b$  (рис. 3.3, б).

Значення питомої енергії можуть бути збільшені в разі застосування міцнісних елементів (наприклад, вбудованих бандажів) – тоді механічні напруження локально перерозподіляються. Сферичні (кулясті) ІНЕ характерні тим, що в них витки охоплюють загальну вісь і розміщуються на поверхні сфери (рис. 3.4), причому діаметр витків зменшується при наближенні до полюсів сфери. Витки розташовані один над одним і мають постійний перетин з центром на сфері.

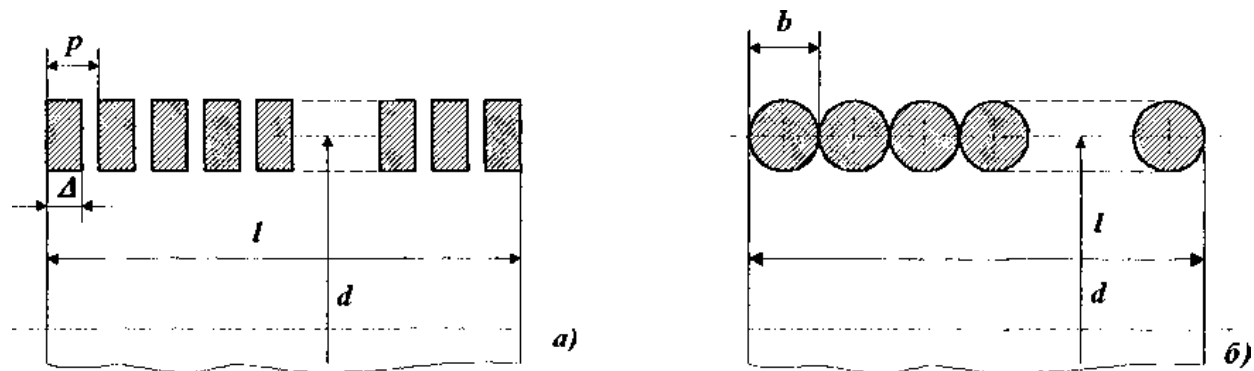


Рисунок 3.3 – Індуктивні накопичувачі у вигляді тонкого соленоїда з прямокутної шини (а) і круглого дроту (б)

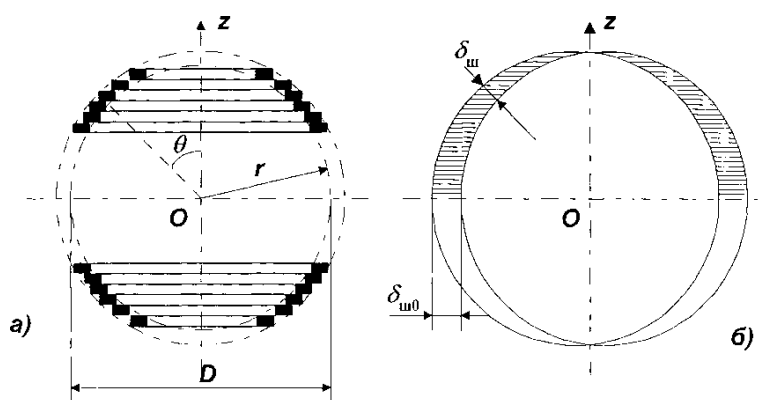


Рисунок 3.4 – Сферичний індуктивний накопичувач енергії (а) і його модель з неоднорідним струмовим шаром (б)

Якщо котушка має  $w_{ш}$  витків, а середній діаметр сфери дорівнює  $D$ , то на одиницю довжини уздовж осі припадає  $w_{ш}' = w_{ш}/D$ . Індуктивність сферичного ІНЕ [14]:

$$L_{ш} = \frac{\pi}{9} \mu_0 D w_{ш}^2 \quad (3.21)$$

Приймається [10] поняття еквівалентного струмового шару, з постійними значеннями щільності струму і коефіцієнта заповнення  $k_{зш}$ , товщина якого дорівнює  $\delta_{ш}$  (рис. 3.4, б).

Сферичні котушки за масогабаритними та енергетичними показниками близькі до котушок Брукса і перевершують тороїдальні. У порівнянні з котушками Брукса вони мають менші зовнішні поля і кращі умови охолодження завдяки

більшій поверхні. У порівнянні з тороїдальними в сферичних створюються більш симетричні електродинамічні зусилля, що діють на витки. Їх основним недоліком є складна технологія виготовлення.

Надпровідникові індуктивні накопичувачі енергії (НПІНЕ). Конструкція надпровідних індуктивних накопичувачів енергії визначається співвідношенням щільності струму і необхідної кількості надпровідника. Магнітне поле і щільність струму не є незалежними змінними, вони пов'язані між собою через характеристики надпровідника.

Існують два основних типи надпровідників: надпровідники I роду і надпровідники II роду. Обидва типи мають абсолютно різні властивості. У довгому стрижні з надпровідника I роду (наприклад, зі свинцю або олова), орієнтованому паралельно магнітному полю, надпровідність може бути лише в поверхневому шарі товщиною декількох сотень ангстремів, в полях нижче деякого критичного рівня, порядку декількох ампер на метр [15]. Поперечний переріз шару малий, внаслідок чого максимальний струм надпровідника виявляється невеликим. Використання надпровідників I роду в якості матеріалів для накопичувачів енергії нераціональне.

До надпровідників II роду відноситься більшість надпровідних сплавів і з'єднань. Щоб надпровідник знаходився в надпровідному стані температура, поле і струм повинні бути менше критичних значень, пов'язаних між собою. При заданих температурі і напруженості поперечного магнітного поля матеріал надпровідника II роду має певний критичний струм, який поблизу критичного поля обмежується числом надпровідних носіїв. При менших полях значення струму обумовлено проявом сили Лоренца. У разі, коли добуток поля на струм досить великий, надпровідна структура рухається відносно фізичної структури, що створює перешкоди руху, що призводить до виділення достатнього тепла, щоб температура надпровідника піднялася вище критичної, і він перейшов в ненадпровідний стан. Струм, при якому цей перехід відбувається, називається критичним струмом [15].



Критичний струм для надпровідника II роду з великим критичним полем сильно залежить від структури матеріалу. Холодна обробка або відпал дуже мало впливають на критичну температуру або верхнє критичне поле, але значно впливають на критичний струм. Граничний струм – це критичний струм при максимальній температурі, що досягається при стрибку потоку, тим менше, чим вище підніметься температура.

Обмотку надпровідникових ІНЕ розміщують в кріостат з рідким гелієм. Надпровідні провідники мають композитну структуру. Тонкі жили надпровідника з діаметром 1 - 10 мкм вкраплені в несучий дріт (мідний, мідно-нікелевий, алюмінієвий та ін. з круговим або прямокутним перетином і характерними розмірами 0,5 - 10 мм), що забезпечує теплову стабілізацію надпровідникових жил і механічну міцність провідника. В одному несучому дроті може бути кілька тисяч надпровідних жил.

У ІНЕ крім надпровідників використовуються гіперпровідники (кріопровідники) [13, 16], одним з яких є надчистий алюміній (99,999 %), охолоджений до температури  $T = 20 - 30$  К (наприклад, рідким воднем або неоном). Опір гіперпровідника в тисячі разів менший у порівнянні з опором при нормальній температурі. Це дозволяє отримувати щільності струму того ж порядку, що і в надпровідниках. За деякими оцінками кріопровідникові накопичувачі енергії досягають значень питомої енергії порядку 20 - 50 Дж/г при ККД накопичення енергії близько 95 % [10].

### 3.4 Ємнісні накопичувачі енергії

Ємнісні накопичувачі енергії (ЄНЕ) акумулюють енергію електростатичного поля. Функціональна схема ЄНЕ представлена на рисунку 3.5.

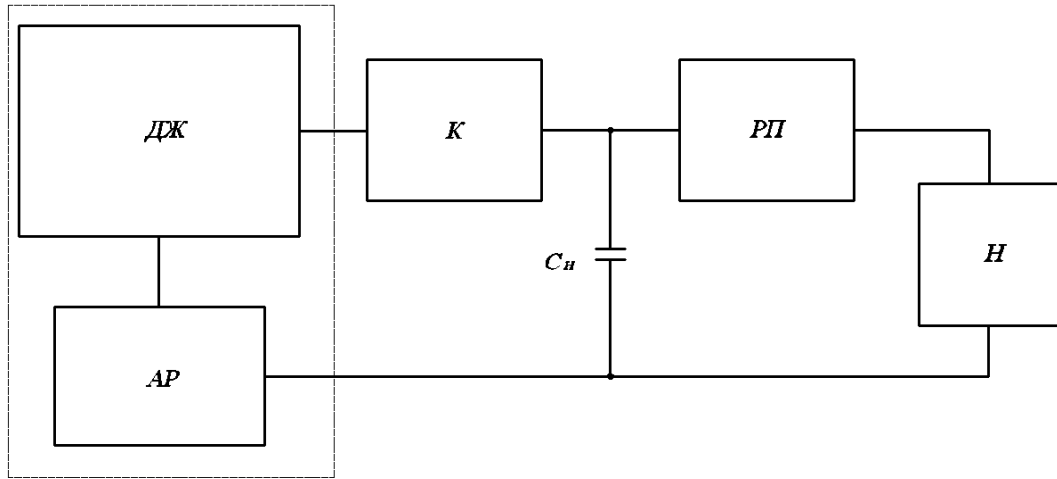


Рисунок 3.5 – Функціональна схема ємнісного накопичувача енергії

Джерело живлення (ДЖ) при замиканні комутатора зарядного ланцюга (К) і розімкнутому комутаторі розрядного пристрою (РП) накопичує енергію в батареї конденсаторів  $C_n$ , в результаті чого за час  $t_3$  батарея акумулює енергію:

$$E_n = 0,5C_n(u_{C_{max}}^2 - u_{C_0}^2) \quad (3.22)$$

де  $u_{C_{max}}^2$ ,  $u_{C_0}^2$  – напруги на ЄНЕ після заряду і перед зарядом.

Розряд відбувається при замиканні комутатора РП, як при розімкнутому, так і при замкнутому К на навантаження Н за час  $t_p$  (зазвичай  $t_p \ll t_3$ ). Зарядний і розрядний процеси можуть бути керовані. В такому випадку управління процесом реалізується за допомогою автоматичного регулятора АР.

Класифікація конденсаторів заснована на основі застосовуваного діелектрика та за конструктивними особливостями, що визначає їх використання [12]. Вид діелектрика визначає такі електричні параметри конденсаторів як: опір ізоляції, стабільність ємності, величина втрат і ін. Конструктивні особливості визначають характерні області застосування конденсаторів.

Високовольтні конденсатори поділяють на високовольтні постійної напруги і високовольтні імпульсні. Основна вимога до високовольтних конденсаторів – висока електрична міцність. Високовольтні імпульсні конденсатори характеризуються високою електричною міцністю і порівняно великими ємностями. Вони повинні допускати швидкі розряди, тобто пропускати великі струми. У зв'язку з цим їх власна індуктивність повинна бути малою, щоб не

спотворювати форми імпульсів. Цим вимогам найкраще відповідають конденсатори паперові, металопаперові і комбіновані.

У 1887 р. Гельмгольц встановив, що на межі розділу між рідким електролітом і твердим тілом формується бар'єрний шар товщиною кількох сотень ангстрем, здатний накопичувати електричний заряд. Підбираючи спеціальні електропровідні матеріали і склад електроліту в напівтвердий, пастоподібній фазі, можна в значній мірі знизити масу і габарити таких конденсаторів з подвійним хімічним шаром. Функцію обкладок в них виконує тонкий шар спеціально підібраного металу і шар пастоподібного електроліту, а функцію діелектрика – молекулярний бар'єрний шар [10].

Протягом останніх років з'явилися комерційні молекулярні конденсатори (англ. ultracapacitors), зі значеннями питомої енергії порядку до 1 В год/кг, питомою потужністю 20 - 40 кВт/кг. Типові ємності досягають 420 Ф [9], щільність ємності перевищує 30 Ф на 1 грам активованого вугілля. Перевагою цих пристроїв є висока надійність і дуже велика кількість циклів прийому - віддачі енергії (близько  $10^6$  -  $10^7$ ). Для прикладу в таблиці 3.2 представлені дані конденсаторів "PSCAP" фірми «Еконд», США. Конденсатори побудовані з серійно з'єднаних секцій, кожна з яких характеризується допустимою напругою 1 - 2 В і ємністю до 250 Ф на 1 секцію. Оскільки секції з'єднані в серії, підвищення напруги батареї веде до зниження значення її ємності.

Ефективність ємнісних накопичувачів енергії тим вище, чим більше ємність конденсатора  $C_n$ , і напруга  $U_p$  перед розрядом. Тому в класичних ЄНЕ зазвичай застосовуються високовольтні конденсатори. У молекулярних конденсаторах значення питомої енергії на один - два порядки вище, ніж в інших типах конденсаторів, в зв'язку з цим розроблені схеми ЄНЕ [11 - 17], що використовують ці конденсатори.

Таблиця 3.2 – Основні дані молекулярних конденсаторів фірми «Елеконд» [16]

Напруга	Ємність	Вага	Накопичена енергія	Питома енергія	Висота конденсатора
В	Ф	кг	кДж	кДж/кг	мм
14	60	7	6	0,86	100
14	100	11	9	0,82	125

14	160	16	16	1,00	170
28	55	20	28	1,40	280
28	85	22	34	1,55	300
28	205	30	80	2,67	400
96	8,5	31	40	1,29	390
64	23	34	40	1,18	420
300	0,85	32	40	1,5	410
36	62	24	40	1,67	340
185	2,6	25	45	1,8	380
140	4,5	22	44	2,0	380
300	0,13	10	6	0,6	300
150	2	18	20	1,11	200
160	2	21	40	1,90	300

У наведеній таблиці 3.2 конденсатори виконані у вигляді циліндра з зовнішнім діаметром 226 мм.

На рисунку 3.6 представлена схема "дзвінкового дроселя". Заряд ємнісного накопичувача  $C$  відбувається по черзі при розряді дозуючих реакторів  $L_1$  та  $L_2$ , які попередньо заряджаються через відповідні тиристори  $T_1$  і  $T_2$ , які, в свою чергу, по черзі включаються з частотою  $f$ , що задається блоком управління.

Процес заряду і розряду дозуючих реакторів повторюється до тих пір, поки напруга на батареї не досягне заданого значення  $U_{сн}$ . Від блоку управління на тиристори  $T_1$  і  $T_2$  по черзі подаються відкриваючі імпульси. Схема ключів ЄНЕ виконана з комутуючим конденсатором  $C_k$  і зв'язку з цим відкриття тиристора будь-якого ключа автоматично призводить до закриття іншого [11].

Перевагою ЄНЕ є високий ККД, який для зарядно-розрядного циклу складає 88 - 90 %. Допустимий з точки зору економії енергії час її зберігання – близько 100 год. Ємнісні накопичувачі характеризуються малим внутрішнім опором, що дозволяє досягати питомої потужності імпульсного розряду близько 100 Вт/см<sup>3</sup>. Ємнісні накопичувачі не мають негативного впливу на навколишнє середовище, вони пожежо- і вибухобезпечні.

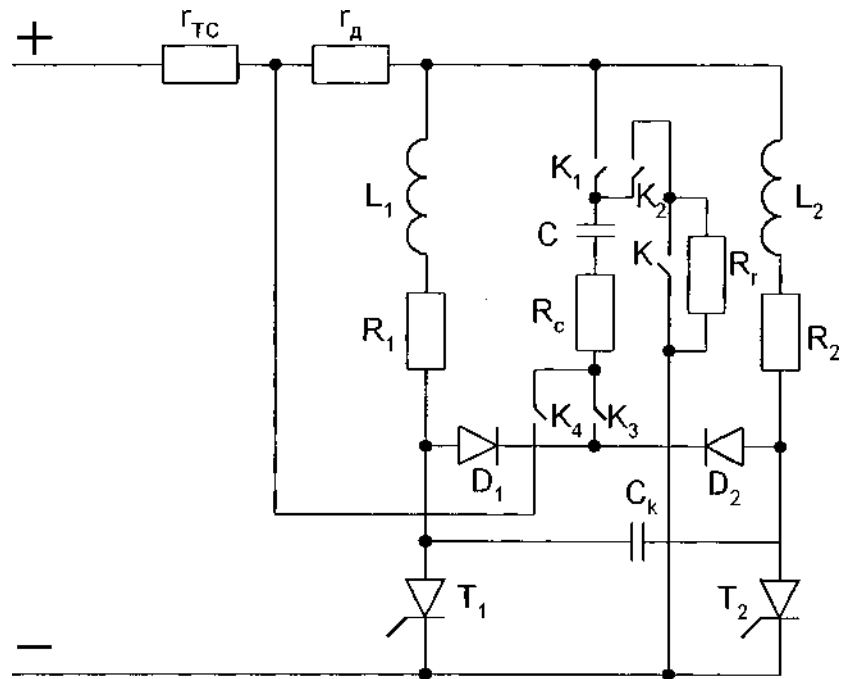


Рисунок 3.6 – Принципова схема ємнісного НЕ [11]

Недоліком ЄНЕ є їх велика кількість контактних з'єднань, що обмежує надійність всього пристрою. Із застосуванням ЄНЕ пов'язана необхідність застосування досить складних додаткових пристроїв для заряду і розряду накопичувача, а також необхідність зміни полярності батарей на протилежну при перемиканні з заряду на розряд [14].

### 3.5 Маховикові накопичувачі енергії

Інерційні механічні енергоакумуючих системи, до яких належать маховикові накопичувачі енергії (МНЕ), призначені для накопичення механічної енергії в маховику або системі маховиків, консервації енергії при обертанні маховика і видачі її споживачеві при необхідних режимних параметрах.

При дослідженні МНЕ необхідний комплексний підхід до оцінки характеристик основних елементів, з огляду на динамічний характер їх робочого процесу, впливу експлуатаційних умов і характеристик системи накопичення в цілому, призначення і т.д. Ефектом такого дослідження є розробка рекомендацій по вибору раціонального складу енергоакумуючих системи і оптимальних параметрів її основних елементів.

Конструктивна форма конкретного МНЕ визначається його призначенням та умовами функціонування. Всі маховикові накопичувачі мають загальні структурні та системні особливості: сукупність основних елементів і зв'язку між ними.

Основний, найбільш характерний елемент системи – маховик, який виконує функції акумулятора енергії і джерела потужності має наступні потенційно позитивні якості [9]:

- висока питома потужність зарядно-розрядних режимів;
- автоматичний перехід з режиму акумуляції (заряду) на режим генерування (розряду) енергії, що забезпечує можливість ефективної рекуперації енергії;
- високий ККД і стабільність характеристик в широкому діапазоні зміни умов експлуатації (тиск, температура і ін.);
- відсутність при роботі побічних викидів, що забруднюють навколишнє середовище.

Механічну енергію, яку накопичують і виділяють маховики, порівняно просто і з високим ККД можна перетворювати в інші види енергії. Крім того, маховик – єдиний накопичувач, що акумулює одночасно з енергією і кінетичний момент, який створює низку додаткових можливостей при застосуванні МНЕ в різних технічних пристроях.

Існує достатньо велика кількість спеціальних матеріалів для виготовлення маховиків. Загальні положення, якими слід керуватися при виборі матеріалу для їх виготовлення такі [9]:

- 1) висока механічна міцність і жорсткість при мінімальній щільності;
- 2) стабільність характеристик протягом всього періоду експлуатації;
- 3) технологічність і не дефіцитність застосованих матеріалів;
- 4) висока корозійна стійкість, термостійкість і т.д.

З точки зору поєднання навантажень найбільш вигідними для конструкцій маховиків є матеріали з максимальною питомою міцністю – відношенням межі міцності конструкційного матеріалу до його щільності ( $\sigma_s/\rho$ ), оскільки розтягування є основним видом навантаження обертового маховика. Для забезпечення стійкості конструкції використовуються матеріали з високою

питомою жорсткістю, тобто відношенням модуля пружності матеріалу до його щільності ( $E/\rho$ ). У таблиці 3.3 представлені основні властивості високоміцних металів, застосовуваних для конструкції маховиків [13]:

Таблиця 3.3 – Міцність високоміцних металів

Матеріал	$\rho \cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_e \cdot 10^9$ Па	$E \cdot 10^9$ Па	$(\sigma_e/\rho) \cdot 10^4$ Па·м <sup>3</sup> /кг	$(E/\rho) \cdot 10^6$ Па·м <sup>3</sup> /кг
Сталь конструкційна легована	7,79	1,76 - 2,20	201	22,6-27,0	25,80
Сплав титановий	4,68	1,18	108	25,2	23,08
Сплав алюмінієвий В96Ц-3	2,89	0,54	67	18,7	23,18
Берилієвий сплав	1,86	0,76	271	40,9	145,70
Алюмінієво- берилієвий сплав	2,40	0,45	135	18,8	56,20

Як видно з таблиці 3.3, берилій характеризується високою питомою міцністю і жорсткістю, високою електро- і теплопровідністю, жаростійкістю, температурою плавлення і кипіння, корозійною стійкістю, здатністю не змінювати розміри і конфігурацію при зміні параметрів навколишнього середовища, але низькою щільністю, високою вартістю, токсичністю і холодноламкістю. До економічної недоцільності застосування берилію в конструкціях маховиків, пов'язаної з його високою ціною, додаються технічні обставини – підвищена чутливість до надрізів в умовах розтягуючих навантажень [9].

Тому для виготовлення маховиків віддають перевагу іншим металам. З наведеної таблиці 3.3 видно, що високоміцні алюмінієві сплави поступаються сталям і титановим сплавам за питомою міцністю, хоча наближаються до них за питомою жорсткістю. Однак, з огляду на більш високу, ніж у сталей, і ще більш високу, ніж у титанових сплавів, технологічність і низьку вартість алюмінієвих сплавів, їх можна ефективно використовувати для виготовлення маховиків.

Використання високоміцних титанових сплавів вимагає спеціальних режимів термообробки елементів і виробів після зварювання і складних технологій. Внаслідок малої щільності вони мають високу питому міцність. Їх недоліком є те, що їх механічні властивості знижуються при підвищенні температури.

Основним недоліком високоміцних сталей є підвищена чутливість до концентраторів напружень, які по-різному виявляють себе в залежності від товщини матеріалу. Наявність концентратора напружень призводить до зниження міцності маховика.

Створення конструкційних матеріалів з високими механічними характеристиками вирішується в двох основних напрямках:

- традиційними методами зміцнення (наклепом, волочінням, термообробкою і т.д.;

- створення волокнистих композиційних матеріалів, які володіють практично будь-якими анізотропними властивостями за міцністю і щільністю.

У першому напрямі існує можливість отримання з стрічок і дротів ефективних структур з досить високою питомою міцністю. При цьому сьогодні освоєні технології виготовлення дроту не тільки круглої, але і квадратної, гексагональної, еліптичної, трикутної і інших форм, що розширює можливості її використання.

Напрямок, пов'язаний зі створенням волокнистих композиційних матеріалів, є більш перспективним. Використовуючи ці матеріали, можна ефективно конструювати ротори маховиків. Композиційні матеріали складаються з пластичного матеріалу (матриці), в який введений і рівномірно розташований наповнювач, наприклад, волокно з високою механічною міцністю різної переробки (елементарне волокно, нитка, джгут, стрічка, тканина і т.д.) [9]. Наповнювач є несучим елементом, а зв'язуючий матеріал (матриця) забезпечує монолітність, жорсткість конструкції та спільність роботи окремих частин наповнювача. Композиційні матеріали дозволяють оптимізувати конструкцію і забезпечувати високу питому міцність за рахунок варіювання об'ємних вмістів і орієнтації наповнювача.

Наповнювачем композиційних матеріалів може бути також сталевий дріт. Він міцний, не надто ламкий і не сильно руйнується від стирання, не вимагає спеціальної обробки, легко використовувати під час намотування, а в якості зв'язуючих можна застосовувати смоли, які мають гарну адгезією до гладких



ниток. При правильному підборі пружності матриці частка реалізованої в конструкції міцності дроту становить приблизно 75 % [11].

Цікавим видом матеріалу є метглас, отримуваний зі сплаву металу, охолодженого зі швидкістю близько мільйона градусів за секунду. Сплав при цьому стає аморфним і наближається за властивостями до скла. З метгласу виходить стрічка товщиною до 0,05 мм, з дуже високою міцністю і корозійною стійкістю. Недоліком його застосування є технологічна складність отримання ефективного з'єднання даного матеріалу з епоксидними сполучними, але є розроблені термореактивні смоли, що забезпечують міцний зв'язок шарів стрічки між собою.

Найбільш перспективне використання в якості наповнювачів композиційних матеріалів – волокон зі скла, бору, вугле- і органоволокна. Звичайний діаметр скловолокна становить 6 - 9 мкм, його отримують видавлюванням розплавленої скломаси через фільтри і швидким витягуванням волокна на виході з них. З нього виготовляють різні типи наповнювачів: пряжу, тканини і т.д. Отримано вуглецеві волокна з межею міцності при розтягуванні  $3,5 \cdot 10^9$  Па і модулем пружності  $700 \cdot 10^9$  Па.

Волокна бору отримують осадженням його з парової фази на тугоплавкий вольфрамовий дріт діаметром близько 13 мкм [9]. Діаметр борного волокна, одержуваного за звичайною технологією з трихлористого бору, становить 76 - 127 мкм. Безперервна довжина волокна досягає 3000 м. Питома жорсткість волокна бору більш ніж в 5 разів перевищує питому жорсткість скловолокна і більше ніж 6 разів – високоміцні сталі.

Волокно Kevlar є типовим представником перспективних високоміцних, високомодульних полімерних волокон. Воно є стійким до дії хімічних речовин і володіє на 20 – 30 % більшою, в порівнянні зі скловолокном, опірністю до поверхневих пошкоджень, хорошими електро- і теплоізоляційними властивостями і не втрачає міцності до  $T = 290$  °С. При отриманні композитів можуть бути використані різні поєднання матеріалів матриці і наповнювача, їх структур і технологічних факторів. Це дозволяє в практичній діяльності проектувати і

виготовляти композиційні матеріали з наперед заданими характеристиками. У таблиці 3.4 [9, 13] наведені механічні характеристики пластиків на основі описаних вище волокон.

Склопластики – композиції синтетичних полімерних смол і армуючих наповнювачів, перш за все склонитки. В'язучими є епоксидні, епоксидно-фенольні і епоксидно-фенольно-кремнійорганічні смоли [9]. Широко застосовуються смоли на епоксидній основі з межею міцності  $(600 - 1000) \cdot 10^5$  Па. До них додається пом'якшувачі для збільшення відносного подовження. Допустиме подовження таких склопластиків досягає 2 – 3 %. Недоліки цих смол – їх низька теплостійкість – міцність матеріалу при  $T = 165 - 180$  °С знижується на 25 – 30 % [9].

Таблиця 3.4 – Міцність композитних пластиків [9]

Матеріал	$\rho \cdot 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_b \cdot 10^9$ , Па	$E \cdot 10^9$ , Па	$\sigma_b / \rho \cdot 10^4$ Па м <sup>3</sup> /кг	$E / \rho \cdot 10^6$ Па м <sup>3</sup> /кг
Склопластик, що армований однонаправленим волокном					
Скло звичайного складу	2	0,8 – 0,9	40	40 - 45	20
Скло підвищеної міцності	2	1,4	40	70	20
Вуглепластик					
Графіл НТ-5	1,5	1,6	130	107	87
Графіл НМ-5	1,6	1,3	190	81	120
Боропласт («Авко»)	2,06	1,75	220	85	107
Органопласт	1,35	1,4	84	104	62

Звичайний вміст наповнювача в пластиці складає 70 – 80 %. Однорідність конструкції порушується, якщо зв'язуючого менше, ніж 20 %. Недоліками склопластиків є низька міцність на розрив волокон, що склеюються і на зріз одного шару відносно другого, а також низьке значення модуля пружності.

Вуглепластики володіють високою питомою жорсткістю, високою статичною витривалістю, мають більш високу, ніж у металів, демпфуючу здатність і віброміцність. Висока теплопровідність вуглецевих волокон знижує саморозігрів матеріалу. Вуглепластики характеризуються незначним або навіть від'ємним коефіцієнтом термічного розширення.

Метали, особливо алюміній і мідь, можуть бути використані в якості матриць композиційних матеріалів. З таких композитів найбільш часто використовуваних є бор-алюмінієвий, що володіє при 50 % об'ємному вмісті борних волокон межею міцності при розтягуванні  $\sigma_b = (1,2 - 1,4) \cdot 10^9$  Па і модулем пружності  $E = (230 - 250) \cdot 10^9$  Па.

Цікаві властивості мають волокнисті композиційні матеріали, отримані з'єднанням високомодульних полімерних волокон з вуглецевими. Полімерні наповнювачі підвищують еластичність, ударну міцність і знижують щільність, а вуглецеві волокна підвищують міцність і жорсткість.

Композиційні матеріали відрізняються від традиційних металевих сплавів створенням композиту одночасно з виготовленням конструкції. Механічні властивості такого матеріалу визначаються розташуванням волокон, так що конструкції можуть виготовлятися з регульованою анізотропією матеріалу. Конструктивно-силові схеми маховиків можна розділити на три великі групи:

- 1) монолітні маховики з ізотропних матеріалів;
- 2) маховики з високоміцних анізотропних матеріалів;
- 3) маховики з високоеластичних матеріалів.

З метою акумулювання енергії перспективні два типи маховиків першої групи: маховики-диски і маховики-стрижні (обертаються навколо поперечної осі). Зазвичай диски значно перевершують стрижні по об'ємній ефективності. Їх енергоємнісні можливості визначаються характеристиками міцності матеріалу.

Маховики другої групи, мають конструктивно-силову схему, засновану на використанні високоміцних анізотропних матеріалів. Сучасні технології дозволяють досягати в подібних виробках (у вигляді волокон, дротів, джгутів, стрижнів, стрічок, пластин і т.д.) більш високі значення питомої міцності, ніж в монолітних заготовках (литих, кованих і т.д.) з аналогічних матеріалів.

Існують гібридні конструкції, що використовують як монолітні, так і анізотропні матеріали. Зазвичай внутрішня, менш напружена частина таких маховиків, як правило, є монолітною, а зовнішня виконується з анізотропних матеріалів [16].

Маховики з високоеластичних матеріалів типу гуми, дозволяють накопичувати не тільки кінетичну енергію обертання і потенційну енергію розтягування, а й енергію пружних резонансних коливань, що призводить до значного підвищення енергоємності маховика [9]. Хоча ці маховики можна віднести до ізотропних, але за характером робочих процесів вони представляють нову групу.

Монолітні маховики. Маховики з ізотропних конструкційних матеріалів застосовуються в різних областях техніки для зниження нерівномірності ходу машин і механізмів, для отримання високих значень імпульсних обертаючих моментів, в гіроскопічних системах і для акумулювання і рекуперації механічної енергії. Переваги монолітних маховиків – жорсткість конструкції, що дозволяє реалізувати різні закони зміни кінетичної енергії. Недоліки монолітних маховиків – це порівняно низька питома енергоємність, пов'язана з невисокою міцністю литих або кованих заготовок, небезпека розриву з утворенням великих осколків з великою пробивною здатністю, що призводить до необхідності забезпечення великих запасів міцності та до зниження кутової швидкості обертання, або до посилення кожуха маховика.

Напружений стан тонких дисків (з відношенням товщини диска  $h$  до його зовнішнього радіусу  $R$  рівним  $h/R = 0,2 - 0,3$ , що часто зустрічається в практиці), вважається плоским, тобто приймається, що напруження в них рівномірно розподілені по товщині диска. Для дисків з матеріалів з високим модулем пружності  $E$  (метали, кераміка) можна також знехтувати зміною при обертанні товщини і радіусу. При цих припущеннях напруження в диску визначені системою звичайних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d}{dr}(\sigma_r h) - (\sigma_t - \sigma_r) \frac{h}{r} + \rho w^2 h r = 0 \\ \frac{d}{dr} \left[ (\sigma_t - \mu \sigma_r) \frac{r}{E} \right] - \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu \sigma_t) = 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

де:  $\sigma_r$  та  $\sigma_t$  - радіальне та тангенціальне напруження;

$\mu$  - коефіцієнт Пуассона;

$r$  - радіус (незалежна змінна).

Із системи (3.23) для заданих радіусів, матеріалу і кутової швидкості обертання  $w$  можна визначити залежність товщини  $h(r)$ , при якій енергоємність маховика буде максимальною. У практиці широко застосовується зворотна задача: визначення з системи (3.23) максимальної питомої енергоємності для диска заданої форми  $h(r)$ .

Питома енергоємність  $E_n$  маховика пропорційна питомій міцності його матеріалу [9], тобто об'ємна ефективність пропорційна міцності матеріалу: коефіцієнт пропорційності  $K$ , який називають коефіцієнтом форми маховика, характеризує ефективність форми: чим вище його значення, тим більше енергоємність маховика при заданих граничних напруженнях:

$$E_n = K\sigma_{max} \quad (3.24)$$

Вираз (3.24) справедливий не тільки для дисків, але і для ізотропних маховиків у вигляді стрижнів, а також і для складених маховиків з одного матеріалу.

Перспективи підвищення енергоємнісних характеристик монолітних маховиків повністю визначаються можливістю подальшого збільшення питомої міцності ізотропних матеріалів. Тому широке застосування монолітних маховиків обмежена можливістю суттєвого підвищення міцності таких матеріалів.

Маховики з композиційних матеріалів. Більш перспективним засобом поліпшення енергоємнісних показників маховиків є застосування для їх виробництва композиційних матеріалів. Композиційні матеріали можуть ефективно використовуватися у випадках, коли виникають в них механічні напруження близькі до одноосьового навантаження (розтягування).

В якості робочих елементів в стрижневих маховиках використовуються високоміцні анізотропні волокна (стрижні). Маховики цієї групи поділяються на стрижневі, у вигляді товстого стрижня, що обертається навколо поперечної осі,

круглі – щіткові (рис. 3.7) і радіально-віялові [9]. Маховик у вигляді квазіізотропного диска є пакетом анізотропних або металевих пластин. Пластини орієнтовані таким чином, щоб властивості складеного диска не залежали від напрямку площинного напруження. Такі диски називають квазіізотропними. Маховик ободного типу складається з множини співвісних концентричних кілець, навитих з анізотропного матеріалу. Області застосування варіантів маховиків визначається на основі порівняння їх показників: питомої енергоємності та об'ємної ефективності.

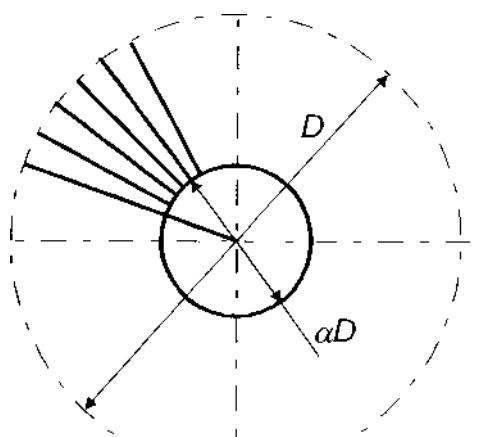


Рисунок 3.7 – Круглий щітковий маховик

Згідно з роботою [10], застосування анізотропних матеріалів є найефективнішим способом досягнення високої енергоємності. Застосування різнорідних армуючих волокон при виготовленні квазіізотропних дисків забезпечує необхідну згінну жорсткість. Найкращим поєднанням питомої енергоємності та об'ємної ефективності володіє маховик ободного типу. Так як рівень втрат потужності в опорах пропорційний кутовій швидкості, а аеродинамічні втрати пропорційні  $w^3$ , маховики ободного типу мають ключову перевагу, оскільки їх максимальна кутова швидкість, внаслідок розміщення акумулюючої маси на периферії, становить приблизно 65 % максимальної кутової швидкості маховика радіально-віялової схеми і майже вдвічі менше, ніж у квазіізотропного диска при співставних значеннях питомої енергоємності. У ободного маховику волокна працюють при максимальних напруженнях по всій периферії ободу. Основною перевагою маховиків квазіізотропної конфігурації є високий рівень об'ємної ефективності, що дозволяє створювати компактні

енергоакумуючі системи. З іншого боку, при його руйнуванні утворюються високоенергетичні осколки, а при цьому, як і в монолітних маховиках, вся енергія при руйнуванні виділяється одночасно і її ефективне розсіювання досить важке.

Запропоновано метод [14], який забезпечує не розшарування намотаного обода і його безпечний розрив. Досягається це навивкою стрічки або волокна з розрахунковим натягом на пружну центральну частину – маточину. При розгоні маховика зона розтягування поступово переходить на внутрішні витки і на маточину, внаслідок чого напруження зовнішнього витка підвищується до робочого.

Були також розроблені некруглі маховики, з багатшаровим крученим ободом, на ступиці із заздалегідь розрахованим числом спиць. Радіус внутрішньої поверхні крученого обода менше радіуса спиць і після установки на спиці обод приймає некруглу форму. Обертаючись на розрахунковій швидкості, обод, прагне роздатися рівномірно і приймає форму близьку до кола. Внутрішній шар приклеюється до спиць або утримується на них силою тертя, а сусідні шари обода утримуються між собою тертям.

Багатоободний маховик, що забезпечує постійний зв'язок між ободами і маточиною на всіх режимах роботи, містить маточину зі спицями і один або кілька ободів, намотаних з високоміцного матеріалу з почерговим обходом спиць з різних сторін. При обертанні маховика кожен елемент обода прагне зайняти положення плоского кільця, чому перешкоджають спиці. В результаті при обертанні забезпечується надійний зв'язок між ободом і маточиною. При високих окружних швидкостях, коли подовження обода стає значним, він займає нове стійке положення, ковзаючи по спицях. Маховик такого типу комбінований, він поєднує в собі елементи ободного і круглого щіточного маховиків.

Особливими пружними якостями володіє технічна гума. Для неї  $\sigma/E > 1$ , тому навіть при невисоких допустимих кутових швидкостях можна отримати в гумовому маховику питому енергію, порівнянну з показниками монолітних сталевих маховиків. При розтягуванні такого маховика його діаметр збільшується

приблизно вдвічі [10]. Маховик з гуми запасає одночасно кінетичну і потенційну енергію.



## **4 ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ У СИСТЕМІ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ**

Розглянемо міжнародний досвід використання накопичувачів енергії в системі енергопостачання та іншому транспорті. У Німеччині був побудований і введений в експлуатацію гібридний моторний вагон, який живився від тягової мережі або, в разі її відсутності на певній ділянці, мав можливість житися від акумуляторної батареї, з пробігом 150 - 180 км [12].

Були спроби застосовувати АБ як допоміжне джерело електроенергії для згладжування піків споживання в електричній тязі. На підстанції були застосовані спеціальні свинцеві акумулятори максимальною сумарною потужністю 1000 кВт і з ємністю, що дозволяє включити АБ на максимальний час постачання 1,5 год. ККД зарядно-розрядного циклу дорівнював близько 70 %, термін служби батареї розраховувався на близько 1500 циклів (10 років ), вартість батарейної підстанції була на рівні вартості гідроакумуючих установок подібної потужності і енергоемності, при площі займаної підстанцією порівняної з площею типової тягової підстанції.

На гірській залізниці в Німеччині, електрифікованої на постійному струмі 1,5 кВ, була застосована батарея свинцевих акумуляторів для прийому енергії рекуперативного гальмування [12]. Було визначено, що оптимальне значення енергії, що акумулюється накопичувачем, дорівнює 800 кВт·год при потужності 800 кВт. Номінальна ємність накопичувача дорівнювала 500 А·год при номінальній напрузі 1600 В. Застосування системи з батарейним накопичувачем дозволило знизити витрати за електроенергію на 125,5 тис. нім. марок на рік. З урахуванням капітальних витрат і витрат на технічне обслуговування системи, економія за рік становить 12,7 тис. нім. марок. Ресурс свинцевої CSM батареї в пропонованих умовах експлуатації оцінюється на близько 2500 повних циклів заряду - розряду (350 в рік). Подібна система, потужністю 17 МВт, розроблена фірмою BEWAG і була введена в експлуатацію та успішно працює в Берліні [16].

В роботі [12] представлена методика розрахунків економії палива, пов'язаної із застосуванням електрохімічного накопичувача на маневровому тепловозі. Таке

рішення дає можливість обмежити номінальну потужність дизельного двигуна тепловоза, а також накопичувати енергію рекуперації тепловоза, оскільки він виконаний з електричною передачею потужності. У порівнянні з хімічними акумуляторами електрохімічні генератори мають більш високі значення теоретичної питомої енергії, але відносно низькими значеннями питомої потужності. Зроблено висновки [9] про можливість створення ЕХГ із строком служби 5000 год і питомими параметрами: 35 - 55 Вт/кг,  $(5 - 7) \cdot 10^2$  Вт/м<sup>3</sup>,  $(36 - 70) \cdot 10^4$  Дж/кг і вартістю 40000 дол/кВт.

З 1979 року проведено в багатьох країнах світу різні розробки надпровідних пристроїв з НППНЕ, починаючи від компактного індуктивного накопичувача енергоемністю 280 Вт·год, представленого на ринку фірмою TOSHIBA, і закінчуючи проектами енергоустановок на 10 ГВт·год для використання замість насосних гідроакумулюючих станцій [12]. Струм в обмотках НППНЕ досягає значень до 150 кА в середніх і до 765 кА в великих установках при місцевих значеннях індукції до 10 Тл. ККД в залежності від типу і потужності накопичувача досягає значень 0,85 - 0,95, з огляду на втрати пов'язані з необхідністю застосування складної системи охолодження. Питома енергоемність, при врахуванні обсягу кріостату, приймає значення 0,25 - 6 кВт·год/м<sup>3</sup>, а питома потужність – 60 кВт/м<sup>3</sup>.

У технічному університеті Мюнхена для Німецьких залізниць (DBAG) пропонувалося виконання всієї установки на стороні 15 кВ тягової підстанції. Накопичувач виконаний у вигляді тороїдальної конструкції з восьми окремих котушок зовнішнім діаметром 5,7 м і масою 7 т кожна. Зовнішній діаметр кріостату 17 м, висота 7,5 м, причому зважаючи на вплив магнітних полів має бути забезпечено простір 8 м. При максимальній магнітній індукції 5 Тл пропонувалося застосувати стандартний надпровідний провід, з сумарною довжиною 92 км (651 витків в котушці, ступінчаста обмотка) і масою 15 т. Для охолодження була запроєктована гелієва установка потужністю 80 кВт в комбінації з азотною установкою потужністю 20 кВт й потужністю приводу вакуумного насоса – 25 кВт [12]. Номінальна енергія заряду – 300 кВт·год, максимальна енергетична ємність –

350 кВт·год при номінальному струмі 8250 А. Номінальна потужність прийому - віддачі при струмі 6300 А дорівнює 18,8 МВт. Для порівняння в роботі [12] представлена батарея електрохімічних акумуляторів аналогічної потужності, масою 90 т з енергоємністю 11,5 МВт·год, займає об'єм 90 м<sup>3</sup>.

Інерційний привід знайшов застосування в підземному транспорті (ФРН, Франція, Швейцарія, США) для виконання маневрових робіт на залізницях (Швейцарія, Англія), для приводу річкових поромів (КНР), а також в міському наземному транспорті (Швейцарія, Австрія) [16]. Привід гіровозу представляв собою обертовий маховик, який розганявся під час зупинок гіровозу на спеціальних зарядних пунктах. У якості зарядного пристрою застосовувався пневмодвигун або електричний двигун. Технічні рішення, прийняті в конструкції гіровозу, на даний час вже безперспективні.

Поки тільки одна система з маховиком використовувалася в якості приводу транспортних засобів – 17 гіробусів швейцарської фірми «Ерлікон», випущених в 1953 р. Вони експлуатувалися до 1968 р. на трасах протяжністю 4,5 - 7,7 км з відстанню між зупинками 0,4 - 1,0, а між зарядними станціями 2 км [12]. Гіробус розрахований на перевезення 70 пасажирів, мав масу 11 т без навантаження і 16 т з повним навантаженням. Силовий електромеханічний агрегат мав загальну масу 2900 кг. Монолітний маховик, діаметром 1,6 м і масою 1500 кг, в формі диска з ободом, прямо з'єднувався з валом мотор-генератора. Він знаходився в герметичному корпусі, заповненому воднем під тиском  $0,7 \cdot 10^5$  Па. При максимальній частоті обертання 3000 об/хв накопичувана агрегатом енергія становила 32,4 МДж (9 кВт·год). Гіробуси характеризувалися низькою вартістю пунктів зарядки і невеликими витратами при експлуатації і ремонті. У сімдесятих роках було побудовано і випробувано два експериментальних зразка гіротролейбуса фірми «Локхід». На початку руху вони заряджалися енергією від тролей, при цьому частина енергії витрачалася на розкрутку маховика, енергія якого потім використовувалася для руху. Монолітний сталевий маховик гіперболічного профілю, з'єднаний з мотор-генератором змінного струму, мав

діаметр 1 м і масу 314 кг. Маховик, разом з мотор-генератором були вакуумовані. Маховик розганявся до 20000 об/хв.

Фірма General Electric (США) розробила комбінований привід тролейбуса з маховиком і акумуляторною батареєю. Загальна маса гіротролейбуса 12,7 т. Розкручуючи маховик, виготовлений із сталевих стрічок загальною масою 1500 кг, з 5000 до 10000 об/хв за 90 с, накопичувана енергія дозволяла переїхати без перезарядки 5,6 - 11 км. При гальмуванні частина кінетичної енергії поверталася в маховик [12].

До експериментальних зразків в даний час доведено транспортні засоби з системами рекуперативного гальмування, зокрема поїзд метро, що випробовувався в м. Нью-Йорку [16].

Другий напрямок використання МНЕ на транспорті – це застосування гібридних систем, що представляють собою сукупність двигуна внутрішнього згоряння і інерційного накопичувача енергії. Більшість дослідників вважає, що їх застосування в наземному транспорті більш реально [16 - 18]. У США йдуть розробки, що фінансуються Департаментом транспорту, спрямовані на застосування гібридних схем в автобусі [17]. З'явилися також спроби застосування в гібридних транспортних засобах молекулярних накопичувачів [17, 18]. У Західній Європі цікаві результати були отримані для застосування МНЕ в гібридних системах для накопичення енергії вітру [16 - 18].

Механічні інерційні накопичувачі енергії знайшли теж застосування в системах електропостачання електричної тяги. Перша дослідна установка такого типу (рис. 4.1) з'явилася в Японії в 1981 р на приватній приміській залізниці [17]. Монолітний сталевий маховик розкручується в вакуумованому кожусі з частотою обертання від 800 до 1600 об/хв., накопичуючи 15 кВт·год (54 МДж) енергії. Момент інерції маховика дорівнює  $5130 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , його маса – 14 600 кг. Тиск повітря всередині кожуха підтримується на рівні 1 кПа (1/100 атмосферного тиску). Мотор-генератор – машина постійного струму з незалежним збудженням, потужністю 750 кВт і напругою 1500 В, прямо підключена до тягової мережі. Коефіцієнт повернення МНЕ по експлуатаційним даними дорівнює 70 %,

враховуючи аеродинамічні втрати, живлення вакуумного насоса, втрати в магнітних опорах і т.п.

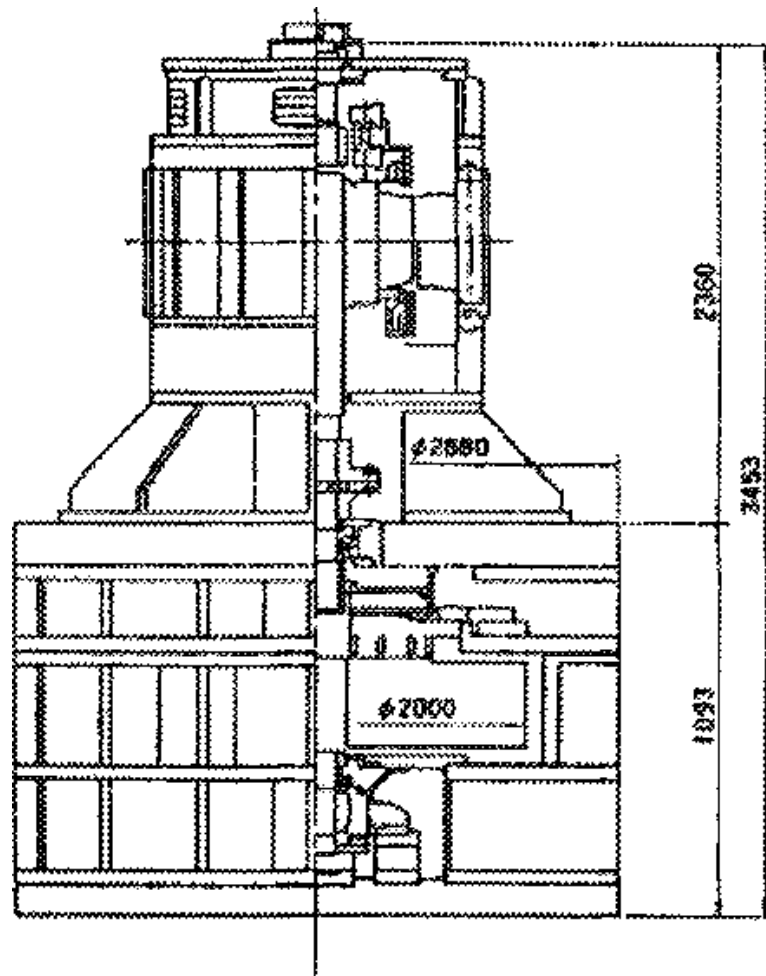


Рисунок 4. 1 – Маховикові накопичувач енергії японського виробництва

На основі отриманого досвіду в 1988 р була теж в Японії змонтована ще одна енергоустановка з МНЕ ємністю 30 кВт·год (108 МДж) з асинхронним мотор-генератором змінного струму [15, 16].

Електрична тяга може розглядатися як специфічна електроенергетична система з рухомими навантаженнями (електропоїздами). Вона, як правило, характеризується більш високими значеннями нерівномірності навантаження, ніж стаціонарні електроенергетичні споживачі. Інша особливість визначається застосуванням рекуперативного гальмування, тобто гальмування електропоїздів з поверненням електроенергії в тягову мережу.

При застосуванні рекуперації в системі енергопостачання можливі такі варіанти:

- енергія, що рекуперується в тягову мережу може поглинатися тільки іншими поїздами, які працюють в тяговому режимі, а при наявності надлишкової енергії вона гаситься безпосередньо на поїзді (реостатне гальмування) або на тяговій підстанції (пристрій гасіння надлишкової енергії рекуперації);

- тягові підстанції дообладнуються інверторними агрегатами ІА, причому ІА може бути поєднаний з випрямною установкою ВУ (рис. 4.2, а);

- в системі застосовуються накопичувачі енергії, енергоємність яких повинна бути розрахована на поглинання енергії рекуперації, причому накопичувачі можуть бути встановлені на шинах тягової підстанції (рис. 4.2, б), в середині фідерної зони, а також безпосередньо на поїзді.

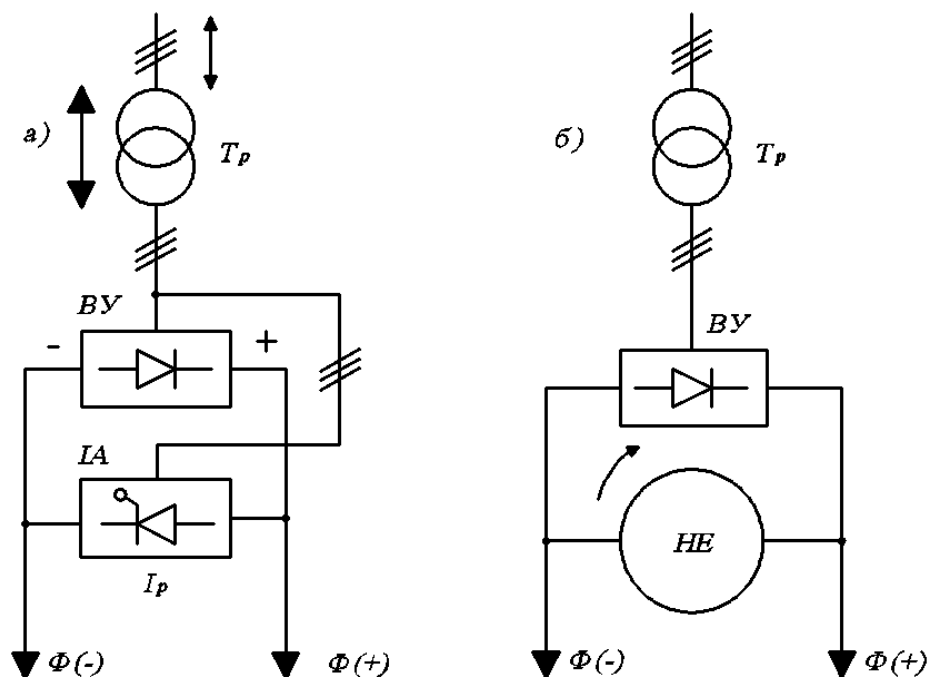


Рисунок 4.2 – Можливі варіанти прийому енергії рекуперації:

а) прийом інверторними агрегатами, б) прийом енергії накопичувачем енергії

Доцільність застосування накопичувачів енергії. Основними цілями застосування накопичувачів в системах електричного транспорту є такі:

- поглинання надлишкової енергії рекуперації, тобто тієї частини енергії, що повертається поїздами в мережу, яка не може бути використана іншими поїздами, які працюють в тяговому режимі;

- згладжування піків споживання енергії з первинної енергосистеми шляхом підживлення тягової мережі від накопичувача, якщо величина тягового навантаження перевищує деяке граничне значення.

Нерівномірність споживання зазвичай оцінюють за допомогою спеціальних показників, з яких найпростішим є пік-фактор, що є відношенням пікової потужності  $P_{max}$  до середньої потужності  $P_{cp}$ ,

$$\Pi = \frac{P_{max}}{P_{cp}} \quad (4.1)$$

Сенс зниження пік-факторів полягає в тому, щоб:

- гарантовано обмежити граничне значення потужності, споживаної від джерела, оскільки це значення впливає на величину тарифу по оплаті електроенергії;
- знизити втрати електроенергії в магістральних і розподільних мережах електропередачі.

Залежно від конкретної ситуації основним може бути перший або другий фактор. У разі превалюючої дії першого фактора для оцінки нерівномірності енергоспоживання і відповідно ефективності застосування накопичувачів може бути використаний пік-фактор в його найпростішій інтерпретації за формулою (4.1). Якщо ж переважаючим є фактор зниження втрат, то пік-фактор (4.1) перестає бути прийнятною оцінкою і слід орієнтуватися на показники інтегрального типу, в яких враховується вся крива споживаної потужності  $P(t)$  або струму  $I(t)$ , наприклад, на коефіцієнт форми  $k_f = I/I_{cp}$ , який являє собою відношення діючого значення струму  $I$ , споживаного з енергосистеми до його середнього значення  $I_{cp}$ . Втрати в системі електропостачання можна вважати пропорційними квадрату коефіцієнта форми.

Для конкретної ситуації можуть бути побудовані графіки, що показують залежність показників  $\Pi$  і  $k_f$  від енергоємності  $E_n$  накопичувача електроенергії. Ідеальний випадок має місце при  $E_n = E_n_{max}$ , але зазвичай в практиці цей випадок недосяжний технічно або ж частіше недоцільний економічно зважаючи на великі

капітальні витрати на накопичувачі. Тому доводиться орієнтуватися на деяке проміжне значення енергоємності  $E_n < E_{n \max}$ , при якому приведені витрати мінімальні.

Конкретний вид кривих  $P(E_n)$  і  $k_{\phi}(E_n)$  істотно залежить від характеру споживання потужності, причому в разі, коли функція  $P(t)$  може розглядатися як випадкова ергодична функція, ці криві можна отримати шляхом моделювання, яке може бути виконане на основі імовірнісних розподілів, що характеризують процес споживання потужності. Ці розподіли дають статистичні характеристики відхилень від середнього значення потужності.

Вплив місця установки накопичувача на якість регулювання. Накопичувач може бути встановлений:

- безпосередньо на поїзді;
- на фідерах підстанції;
- приблизно в середині фідерної зони.

Найкраща якість згладжування виходить при накопичувачі на поїзді, але технічно бортовий накопичувач на даний час реалізувати складно. Стаціонарний накопичувач не впливає на потоки енергії в тяговій мережі, але вирішує завдання згладжування для тягової підстанції ТП і первинної енергосистеми ПЕС, а також забезпечує можливість застосування рекуперативного гальмування на поїздах. Є два варіанти установки стаціонарних накопичувачів: на фідерах тягової підстанції або в середині фідерної зони, тобто на посту секціонування. В умовах наземного залізничного транспорту, зокрема в системі приміських сполучень, розміщення тягових підстанцій не пов'язане з пунктами зупинок і, крім того, в залежності від реалізованого графіка руху в фідерній зоні підстанції може перебувати кілька поїздів, які одночасно гальмують. Тому задачу вибору ємності накопичувача можна вирішувати шляхом статистичного аналізу.

Управління процесом енергообміну в накопичувачі. Завдання управління вирішується по-різному в загальній електроенергетиці і в електричній тязі. У загальній електроенергетиці в ідеальному випадку накопичувач повинен забезпечити постійний рівень споживання електроенергії від джерела, тобто від



первинної енергосистеми, компенсуючи відхилення від середнього значення потужності (рис. 4.3). Реально накопичувач може компенсувати лише частково зазначені піки і провали, так що доводиться встановлювати окремо рівень компенсації піків і якщо споживана системою потужність перевищує цей рівень, то накопичувач включається в режим віддачі, а якщо споживана потужність нижче певного рівня, то реалізується режим накопичення енергії. При цьому значення цих рівнів, тобто ліній перемикання і величина енергоємності накопичувача встановлюються шляхом статистичного аналізу з урахуванням заданого значення показника, що характеризує нерівномірність споживання потужності від джерела.

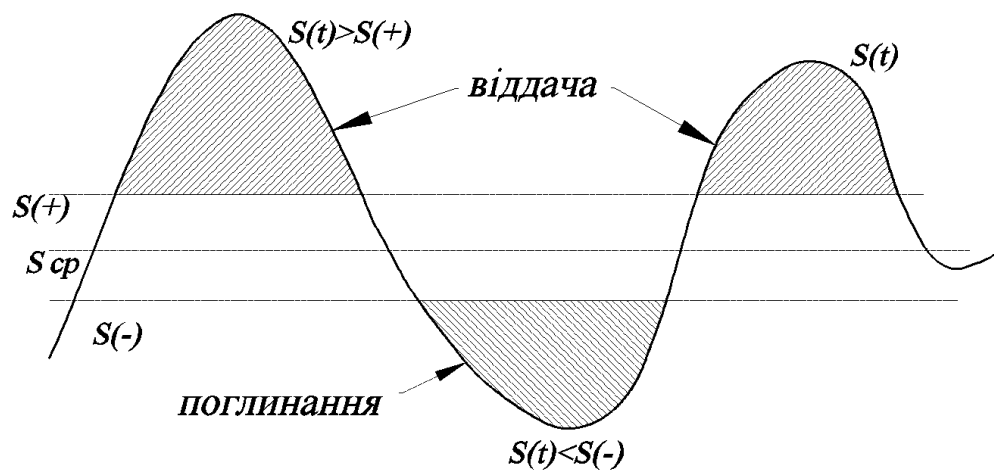


Рисунок 4.3 – Принцип застосування накопичувача енергії в системі енергопостачання

В електричній тязі при наявності рекуперативного гальмування застосовують інший алгоритм. По-перше, тут потрібно чітко розрізняти, коли має місце рекуперація з надлишком потужності, що віддається в порівнянні зі споживаною потужністю (режим надлишкової енергії рекуперації). Інший режим – це коли споживана потужність перевищує ту, що віддається. У першому випадку алгоритм управління накопичувачем достатньо простий – накопичувач повинен поглинути всю надлишкову енергію; а його параметри повинні бути обрані саме за цим режимом. У другому випадку принцип управління енергообміну може варіюватися, причому можна виділити два крайніх випадки (рис. 4.4):

- реалізується алгоритм максимально швидкої віддачі накопиченої енергії, що виправдовується тим, що накопичувач повинен бути швидше звільнений для прийому наступної порції енергії рекуперації;

- процес віддачі енергії регулюють за принципом підтримки деякого рівня споживаної від енергосистеми значення потужності або мінімально допустимого рівня напруги на фідерах.

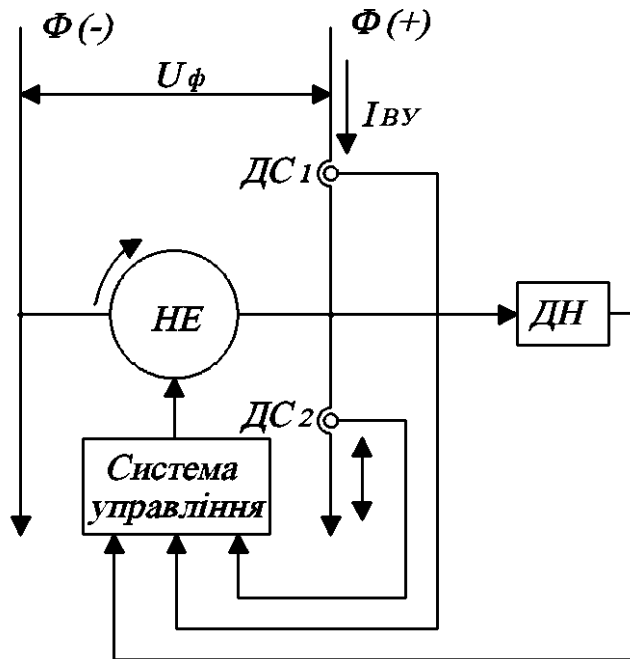


Рисунок 4.4 – Схема системи управління накопичувачем енергії

Побудова системи управління визначається також наявністю датчиків для реалізації зворотних зв'язків, тобто датчиків споживаної потужності (або струму) і датчиків напруги. Можливо регулювання тільки за сигналами датчика напруги на фідерах підстанції, тобто при підвищенні напруги вище напруги холостого ходу повинен включатися накопичувач, стабілізуючи напругу в деяких межах напруг, причому в цьому випадку алгоритм управління накопичувачем еквівалентний алгоритму управління інверторним агрегатом. Цей алгоритм може бути вдосконалений застосуванням зворотних зв'язків за струмом фідерів і за струмом (потужності) самого накопичувача (рис. 4.5).

Дві основні задачі: поглинання надлишкової енергії рекуперації і згладжування піків споживання можуть вирішуватися одночасно, тобто одним і тим же накопичувачем, але алгоритми управління будуть дещо відрізнятися, хоча

загальний принцип включення накопичувача на поглинання або віддачі енергії залишається універсальним. При цьому на діаграмі «струм - час» по рис. 4.5 в якості значень струму перемикавання виділяються:

- деяке позитивне максимальне значення  $I'_{\Pi}$ , вище якого стаціонарне джерело живлення не може забезпечити тягове навантаження, так що при  $I > I'_{\Pi}$  тягове навантаження повинне підживлюватися від накопичувача (заштрихована частина на рис. 4.5);

- нульове значення струму  $I''_{\Pi} = 0$ , так, що при  $I < 0$  накопичувач включається на заряд.

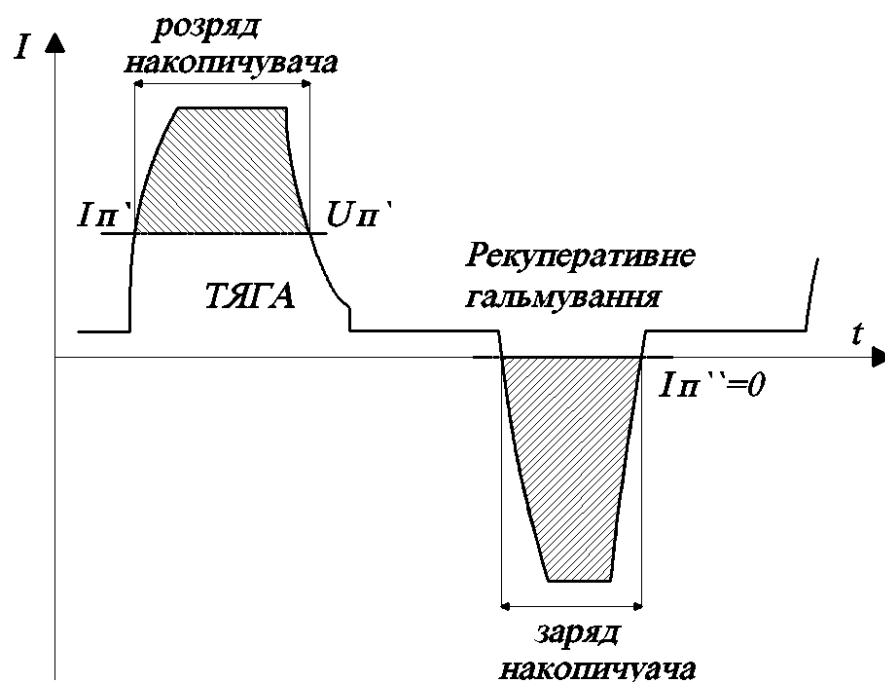


Рисунок 4.5 – Зв'язок режимів роботи накопичувача зі значеннями струмів в системі електропостачання

Зазначений принцип управління для цілей практичного використання необхідно перетворити так, щоб включення накопичувача і перемикавання його режимів здійснювалося в функції напруги. Це розглянуто нижче стосовно до випадку, коли накопичувач встановлений на тяговій підстанції і підключений до її фідерів. На рисунку 4.6 показана зовнішня характеристика підстанції, тобто залежність  $U_{\phi}(I_{\phi})$ . При цьому струмі  $I'_{\Pi}$  відповідає напруга  $U'_{\Pi}$ , так що накопичувач може включатися на віддачу енергії (розряд) при  $U_{\phi} < U'_{\Pi}$ . Включення накопичувача на заряд здійснюється при  $U_{\phi} > U''_{\Pi}$ .

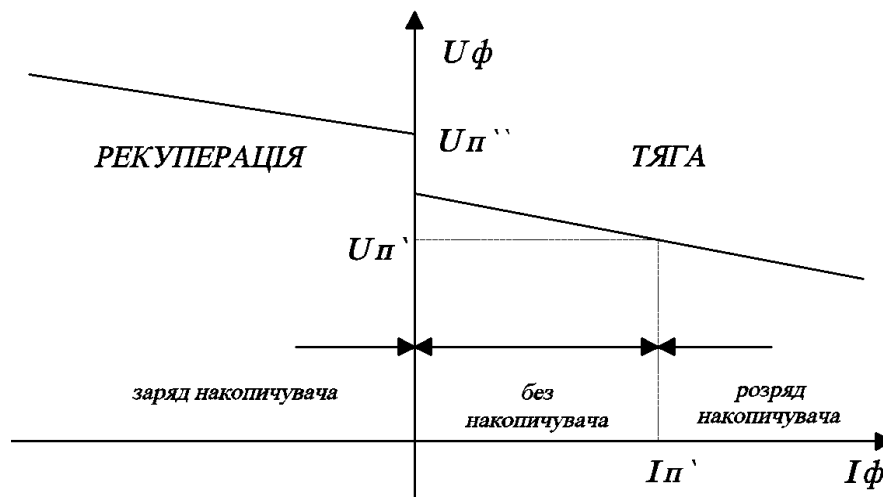


Рисунок 4.6 – Зовнішня характеристика тягової підстанції з підключеним до неї накопичувачем енергії

Додатково в процесі заряду рекомендується контролювати напрям струму в фідері. Таким чином умова  $U_{\phi} > U''_{\Pi}$  використана лише для початкового включення накопичувача в режим заряду. Далі перевіряється умова  $I_{\phi} = 0$  та  $I_{рек} > 0$ , так що заряд триває тільки при виконанні цієї умови. Заряд припиняється при  $I_{\phi} > 0$  або при  $I_{рек} < 0$  (рис. 4.7).

Ефективність тієї або іншої стратегії управління визначається шляхом моделювання, причому цей процес може поєднуватися з процесом управління, для чого в системі управління накопичувачем має бути передбачено мікропроцесорний пристрій, а відповідна система повинна реалізувати принцип самонавчання та адаптації. Це завдання перетворюється таким чином в класичну задачу загальної теорії управління, вирішуване в умовах невизначеності з поступовим накопиченням інформації про об'єкт управління.

Оцінка якості використання накопичувача. У даній системі критерієм якості повинно бути виконання наступних умов:

- накопичувач поглинає всю надлишкову енергію рекуперації;
- накопичувач забезпечує обмеження споживаного струму на рівні  $I'_{\Pi}$  (рис. 4.5).

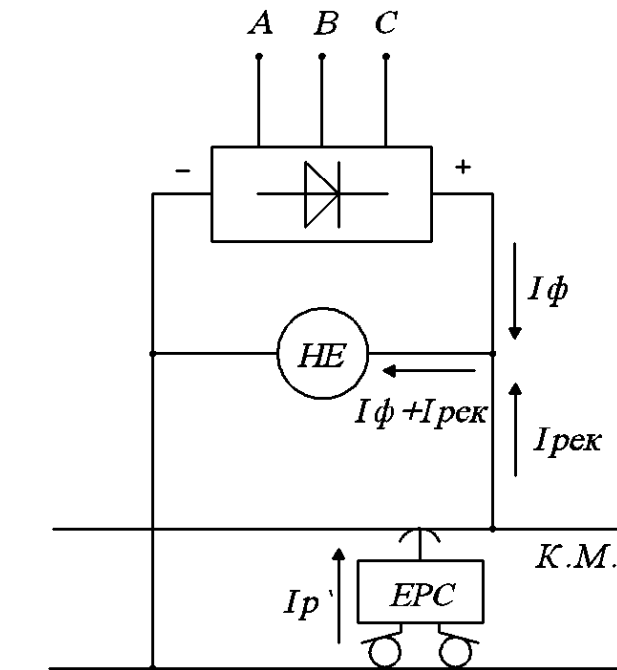


Рисунок 4.7 – Струми тягової підстанції з накопичувачем енергії

Якщо графік руху поїздів вважати фіксованим (незалежно від того, є в системі накопичувач чи ні), то виконання зазначених умов визначається вибором параметрів:

- енергоємність накопичувача  $E$ ;
- рівень  $I'_{\Pi}$ .

Мінімальна енергоємність накопичувача відповідає максимальному інтегралу від рекуперативного струму

$$E_{min} = \int_{t_1}^{t_2} I_{рек} U dt$$

Шляхом статистичного аналізу можна знайти таке значення  $I'_{\Pi}$ , щоб будь-яке перевищення струму над  $I'_{\Pi}$  було компенсовано накопичувачем. Якщо це значення  $I'_{\Pi}$  виходить занадто великим, то для зниження  $I'_{\Pi}$  потрібно збільшити енергоємність накопичувача  $E$ .

Дане рішення задачі відповідає оптимальній енергоємності  $E_{opt}$ . Якщо її зменшувати, то з'являється надлишкова енергія рекуперації та (або) некомпенсовані накопичувачем піки споживання.

Враховуючи наведений у третьому та даному розділах аналіз, можна запропонувати для системи енергопостачання України комплекс заходів по енергозбереженню. Для даної мети пропонується комбінація накопичувачів та окреме їх використання в залежності від поставлених задач. Щодо першого варіанту, то пропонується комбінація накопичувачів таких як акумуляторні батареї АБ разом з ємнісними накопичувачами ЄНЕ. У такому випадку поєднуються позитивні якості ЄНЕ (висока швидкість процесу заряд - розряд) і АБ (порівняно висока питома потужність). Використання ємнісних накопичувачів енергії ЄНЕ особливо раціональне, коли навантаження має короточасні піки. Таку комбінацію раціонально використовувати в енергетичних системах, у яких навантаження нерівномірне протягом доби. Крім того, молекулярні конденсатори знаходяться в стадії розвитку і можна очікувати, що найближчими роками принесуть значне поліпшення їх енергетичних показників, особливо питомої енергії. Даній комбінації буде сприяти і зменшення вартості суперконденсаторів та акумуляторних батарей.

У якості другого варіанту пропонується використання накопичувача енергії на базі високоємнісних маховиків, виконаних з композиційних матеріалів, які розміщені в герметичному кожусі та з'єднаних з мотор-генератором. Їх ККД становить приблизно 95 % в порівнянні з 67 % у гідроакумуючої системи і 70 % у літій-сірчаної батареї [9]. Вони придатні для розміщення в містах, поблизу споживачів, з огляду на безпеку, практичної відсутності забруднення зовнішнього середовища, невеликій займаній площі (300 - 400 м<sup>2</sup> на 10 кВт·год енергії, що акумулюється [12]). Дуже важливою перевагою маховиків є високий рівень питомої потужності, що дає можливість реалізувати короткі цикли заряду. Також вони можуть бути ефективно використані в якості синхронізованого працюючого резерву основної енергосистеми при коливаннях навантаження. Приблизна вартість МНЕ може оцінюватися за цінами матеріалів ротора маховиків, їх виготовлення і збірки, а також інших елементів конструкції і устаткування.

## **5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ**

Енергозбереження, як діяльність спрямована на раціональне використання енергії і природних енергетичних ресурсів. Енергозбереження є важливою ланкою у ланцюзі господарської діяльності людини. Навіть, в цивілізованих країнах, де добувають вуглеводні, переймаються проблемами енергозбереження та розвитку альтернативних джерел енергії. Для України енергетика має особливе значення, оскільки це питання пов'язане з енергонезалежністю країни.

Економічна ефективність заходу з енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності – система вартісних показників, що відображають прибутковість (рентабельність) заходів з енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності.

Умовне паливо – умовно-натуральна одиниця виміру кількості палива, що застосовується для порівняння палива різних видів за допомогою калорійного коефіцієнта, рівного відношенню тепловмісту 1 кг палива даного виду до тепломісткості 1 кг умовного палива (7000 ккал/кг).

Паливно-енергетичний баланс – система повного кількісного зіставлення приходу і витрати енергетичних ресурсів (включаючи втрати і залишки паливно-енергетичних ресурсів господарюючого суб'єкта за обраний інтервал часу).

Можна виділити наступні результати, на досягнення яких повинна бути спрямована реалізація енергозберігаючих заходів:

- економія енергетичних ресурсів в натуральному і вартісному вираженні;
- скорочення питомого споживання енергетичних ресурсів;
- забезпечення приладами обліку за всіма видами енергетичних ресурсів;
- скорочення витрат на оплату енергетичних ресурсів і комунальних послуг;
- інші результати.

Розрахунок ефекту від комплексу заходів з енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності базується на методі розрахунку ефекту від окремого заходу:

- визначаються значення показників споживання за базовий рік;

- розраховуються значення коефіцієнтів порівнянних умов;
- виконується розрахунок індикаторів;
- виконується розрахунок показників ефективності програми енергозбереження.

Спільна реалізація групи енергозберігаючих заходів може мати різний характер впливу на сукупний потенціал енергозбереження зазначеної групи. По виду впливу на сукупний потенціал енергозбереження енергозберігаючі заходи класифікуються наступним чином:

- взаємонезалежні;
- взаємовиключні;
- взаємодоповнюючі;
- взаємовпливаючі.

Енергозберігаючі заходи визначаються як взаємонезалежні (незалежні в сукупності), якщо в рамках розглянутих умов прийняття або відмова від одного з них ніяк не впливає на можливість або доцільність прийняття інших і на їх ефективність. Величина потенціалу енергозбереження групи взаємонезалежних енергозберігаючих заходів дорівнює арифметичній сумі потенціалу енергозбереження окремих заходів.

Енергозберігаючі заходи визначаються як взаємовиключні (альтернативні), якщо здійснення одного з них робить неможливим або недоцільним здійснення інших. Потенціал енергозбереження групи взаємовиключних енергозберігаючих заходів при виборі з цієї групи конкретного заходу дорівнює потенціалу енергозбереження обраного заходу.

Енергозберігаючі заходи визначаються як взаємодоповнюючі, якщо з яких-небудь причин вони можуть бути прийняті або відкинуті тільки одночасно. Взаємодоповнюючі енергозберігаючі заходи необхідно попередньо об'єднати в групу заходів і згодом розглядати як одиничний захід.

Енергозберігаючі заходи є взаємовпливаючими, якщо при їх спільній реалізації виникають додаткові (системні) позитивні або негативні ефекти, що не виявляються при реалізації кожного із заходів окремо. При спільному виконанні



взаємовпливаючих енергозберігаючих заходів потенціал енергозбереження групи заходів не буде арифметичною сумою величин потенціалу енергозбереження зазначених заходів, реалізованих незалежно один від одного.

Врахування взаємного впливу заходів для об'єкта або суб'єкта планування заходу визначається експертно. Взаємний вплив заходів, включених до типових проектів з енергозбереження (позитивні і негативні фактори взаємовпливу) зазначено в складі кожного типового проекту).

Оскільки однією з цілей оцінки ефективності енергозберігаючих заходів є обґрунтування кращого вибору на основі зіставлення фінансових витрат на реалізацію зазначених заходів та ефекту у вигляді економії енергетичних ресурсів при їх оберненні (виробництві, транспорті, споживанні), необхідно конкретизувати послідовність і умови застосування показників для оцінки заходів.

У даній методиці представлені способи розрахунку наступних показників:

- термін окупності капіталовкладень,
- річна економія енергетичних ресурсів відносно заходу в натуральному вираженні,
- річна економія енергетичних ресурсів відносно заходу в вартісному вираженні.

Важливим питанням також є оцінка терміну окупності, який досить часто використовують для оцінки інвестиційної привабливості заходів з енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності

Термін окупності – це період часу, необхідний для того, щоб доходи, які генеруються інвестиціями, покрили витрати на інвестиції. Наприклад, якщо проект вимагає інвестицій (вихідний грошовий потік, англ. Cash Flow) в 2000 тис. грн. і ці інвестиції будуть повертатися по 1000 тис. грн. на рік, то можна говорити, що термін окупності проекту становить два роки. При цьому тимчасова цінність грошей (англ. Time Value of Money) не враховується. Цей показник визначають послідовним розрахунком чистого доходу (англ. Present Value) для кожного періоду проекту. Точка, в якій чистий дохід прийме позитивне значення, буде точкою окупності.

Однак у терміні окупності є недолік. Полягає він у тому, що цей показник ігнорує всі надходження грошових коштів після моменту повного відшкодування початкових витрат. При виборі з декількох інвестиційних проектів, якщо виходити тільки з терміну окупності інвестицій, не враховуватиметься об'єм прибутку, створений проектами.

Простий термін окупності (кількість періодів) визначається за формулою:

$$T_{\text{ок}} = E_{\text{інв}}/E_t \quad (5.1)$$

де  $E_t$  – економія в період часу (на етапі  $t$ ),

$E_{\text{інв}}$  – інвестиції (капітальні вкладення) в проект.

Заходи з енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності реалізуються з метою зменшення обсягів споживання паливно-енергетичних ресурсів і води або більш раціонального їх використання.

Досягнутий ефект від реалізації заходів (економія) може бути оцінений як в натуральному, так і у вартісному вираженні. Визначення досягнутої економії необхідно для розрахунку терміну окупності заходів з енергозбереження, для порівняння планових показників енергозбереження з фактичними, а також при проведенні енергетичного обстеження.

Заходи, проведені в рамках програми з енергозбереження, можуть бути спрямовані як на збільшення потенційної економії споживання ресурсів в загальному (наприклад, заходи щодо пропаганди енергозбереження), так і на економію окремих видів паливно-енергетичних ресурсів або на їх економію на різні цілі, наприклад, опалення або освітлення.

В якості заходів першої групи в освітніх установах можуть виступати такі заходи як пропаганда енергозбереження у вигляді різних конкурсів, тематичних лекцій, розміщення у відкритому доступі пропагандистських інформаційних матеріалів, заходи щодо підвищення компетенцій освітян в галузі енергозбереження та інші заходи організаційного характеру.

В якості заходів, спрямованих безпосередньо на економію паливно-енергетичних ресурсів і води можна виділити наступні групи заходів.

При визначенні розміру економії, досягнутої в результаті реалізації заходів з енергозбереження, повинні враховуватися такі чинники:

1) зміна режимів функціонування і (або) функціонального призначення енергоспоживаючих установок;

2) зміна кількості споживачів енергоресурсів;

3) зміна площі і обсягів приміщень (наприклад, при введенні в експлуатацію нових або реконструйованих будівель і виведення з експлуатації старих і аварійних будівель);

4) суттєва зміна погодних умов – середньодобової температури зовнішнього повітря, середньодобової температури зовнішнього повітря в опалювальний період;

Перераховані вище фактори можуть бути враховані завдяки застосуванню коефіцієнтів порівнянних умов, які розраховуються на підставі значень індикаторів за різні періоди і дозволяють порівнювати споживання ресурсів за базовий період і період, для якого визначається економія.

В якості таких коефіцієнтів можуть виступати:

- коефіцієнт порівнянних умов до опалення;
- коефіцієнт порівнянних умов до висвітлення;
- коефіцієнт порівнянних умов до технології;
- коефіцієнт порівнянних умов до чисельності співробітників.

Серед наведеного вище відносно визначення економічного ефекту від впровадження накопичувачів енергії важливим є їх енергоємність, потужність, яку вони можуть прийняти і потім віддати і, звичайно, вартість.

Як зазначалося у роботі для умов залізниці, метро та деяких випадків міського електротранспорту перевагу віддаємо наземним стаціонарним енергоакумуляторам.

Розглянемо для прикладу конкретну ділянку залізниці, а саме Кременчуцьку дистанцію електропостачання Південної залізниці.

Згідно наданих даних на тягу поїздів витрати електричної енергії склали 46199444,5 кВт-год за 2019 рік. Можна припустити, що і у 2020 р. і в наступних роках рівень енергоспоживання не зменшиться, а може навіть і збільшитися. Про це ж свідчить і динаміка зростання енергоспоживання на тягу у порівнянні з 2018 р. (32371162 кВт-год). На цій підставі будемо вважати припустимим при розрахунках економічного ефекту брати наявну вартість електричної енергії, яка складає станом на 01.09.2020 р. 2,45 грн/кВт-год.

Таким чином при річному споживанні електричної енергії на рівні 46199444,5 кВт-год витрати за спожити електричну енергію будуть становити:

$$B = E_{\text{рік}} \cdot C_i = 46199444,5 \cdot 2,45 = 113188639,025 \text{ грн.} \quad (5.2)$$

де  $E_{\text{рік}}$  – спожита за рік енергія на тягу поїздів;

$C_i$  – вартість одного кВт-год.

Тобто, лише на одній ділянці витрати на електроенергію становлять 93,4 млн. грн.

Оскільки профіль на даній ділянці не має значних ухилів, то можна очікувати, що сумарна енергія рекуперації може сягати 20 - 25 %, тобто

$$E_p = E_{\text{рік}} \cdot k_p = 46199444,5 \cdot 0,2 = 9239889 \text{ кВт-год.} \quad (5.3)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт рекуперації.

У грошовому еквіваленті це буде складати:

$$B_p = E_p \cdot C_i = 9239889 \cdot 2,45 = 22637728,05 \text{ грн.} \quad (5.4)$$

З формули 5.4 витікає, що за сприятливих умов можна повернути понад 18 млн. грн. за рахунок рекуперації.

Однак, як показує статистика часто виникає ситуація, коли рекуперація неможлива через відсутність приймача електричної енергії. Неможливість використати енергію рекуперації за відсутності накопичувачів або інших приймачів складає за різними оцінками до 30 % від загальної енергії рекуперації, тобто

$$E_{рн} = E_p \cdot k_{рн} = 9239889 \cdot 0,3 = 2771967 \text{ кВт-год.} \quad (5.5)$$

де  $k_{рн}$  – коефіцієнт, що показує втрати енергії через невикористання  $E_p$ .

У вартісному еквіваленті

$$B_{рн} = E_{рн} \cdot C_i = 2771967 \cdot 2,45 = 6791319,15 \text{ грн.} \quad (5.6)$$

Тобто понад 5 млн. грн. буде втрачатися через неможливість здійснення рекуперації енергії.

Як вже зазначалося, використання накопичувачів дозволить вирішити дану проблему. Вартість накопичувача енергії на базі акумуляторних батарей у поєднанні з суперконденсаторами загальною потужністю установки 2,4 МВт складає приблизно 28 млн. грн., а на базі маховиків – 16 млн. грн.

Тоді термін окупності для електрохімічних накопичувачів складе

$$T_{ок}^{хім} = \frac{B_{нак}}{B_{рн}} = \frac{28}{5,6} = 5 \text{ років} \quad (5.7)$$

$$T_{ок}^{мех} = \frac{B_{нак}}{B_{рн}} = \frac{16}{5,6} = 2,9 \text{ років} \quad (5.8)$$

Таким чином, застосування накопичувачів енергії дозволить відносно швидко окупити витрати на їх придбання та дозволить зберегти надлишкову енергію, яка може вироблятися при рекуперації, а інших приймачів енергії (рухомого складу) на ділянці немає. Зауважимо, що у вартість обладнання було закладено витрати на обслуговування, яке являє собою гарантійне обслуговування

на протязі 5 років, після чого виробник забезпечує сервісне обслуговування мінімум 1 раз на рік. У той же час відмітимо, що дане обладнання втручання не потребує та працює в автоматичному режимі.

Також необхідно зауважити, що у разі використання першого запропонованого варіанту (на базі акумуляторних батарей), приблизно 1 раз на 5 років треба бути повністю замінювати акумуляторні батареї, що складатиме біля 1 млн. грн. Однак, на економічну ефективність, враховуючи отримувану віддачу це суттєвого впливу не матиме.

## **6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

### **6.1 Охорона праці, об'єкти підвищеної небезпеки**

Для кращого розуміння цілей та задач охорони праці наведемо деякі визначення з нормативних документів, прийнятих в Україні.

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності (ст. 1 Закону України “Про охорону праці”).

Умови праці – сукупність чинників виробничого середовища і трудового процесу, які впливають на здоров'я і працездатність людини під час виконання нею трудових обов'язків (п. 4.29 ДСТУ 2293-99).

Безпечні умови праці – стан умов праці, за якого вплив на працівника небезпечних і шкідливих виробничих чинників усунуто, або вплив шкідливих виробничих чинників не перевищує гранично допустимих значень. (п. 4.14 ДСТУ 2293-99).

Небезпечний (виробничий) чинник – виробничий чинник, вплив якого на працівника у певних умовах призводить до травм, гострого отруєння або іншого раптового різкого погіршення здоров'я або до смерті. (п. 4.18 ДСТУ 2293-99).

Виробничий ризик – імовірність ушкодження здоров'я працівника під час виконання ним трудових обов'язків, що обумовлена ступенем шкідливості та (або) небезпечності умов праці та науково-технічним станом виробництва (п. 4.5 ДСТУ 2293-99).

Гранично допустиме значення шкідливого (виробничого) чинника – граничне значення величини шкідливого виробничого чинника, вплив якого на людину в разі його щоденної регламентованої тривалості не призводить до зниження працездатності і захворювання в період трудової діяльності та у наступний період життя, а також не справляє несприятливого впливу на здоров'я нащадків ( п.4.20 ДСТУ 2293-99).

Виробничий травматизм - явище, що характеризується сукупністю виробничих травм і нещасних випадків на виробництві ( п.4.23 ДСТУ 2293-99).

Об'єкти підвищеної небезпеки визначаються Законом України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» від 9 квітня 2014 року N 1193-VII. Цей закон визначає правові, економічні, соціальні та організаційні основи діяльності, пов'язаної з об'єктами підвищеної небезпеки, і спрямований на захист життя і здоров'я людей

та докiлля вiд шкiдливого впливу аварiй на цих об'єктах шляхом запобiгання їх виникненню, обмеження (локалiзацiї) розвитку i лiквiдацiї наслiдкiв.

У цьому Законi наведенi нижче термiни вживаються у такому значеннi:

- суб'єкт господарської дiяльностi – юридична або фiзична особа, у власностi або у користуваннi якої є хоча б один об'єкт пiдвищеної небезпеки;
- об'єкт пiдвищеної небезпеки – об'єкт, на якому використовуються, виготовляються, переробляються, зберiгаються або транспортуються одна або кiлька небезпечних речовин чи категорiй речовин у кiлькостi, що дорiвнює або перевищує нормативно встановленi пороговi маси, а також iншi об'єкти як такі, що вiдповiдно до закону є реальною загрозою виникнення надзвичайної ситуацiї техногенного та природного характеру;
- небезпечна речовина – хiмiчна, токсична, вибухова, окислювальна, горюча речовина, бiологiчні агенти та речовини бiологiчного походження (бiохiмiчні, мiкробiологiчні, бiотехнологiчні препарати, патогеннi для людей i тварин мiкроорганiзми тощо), якi становлять небезпеку для життя i здоров'я людей та довкiлля, сукупнiсть властивостей речовин i/або особливостей їх стану, внаслiдок яких за певних обставин може створитися загроза життю i здоров'ю людей, довкiллю, матерiальним та культурним цiнностям;
- порогова маса небезпечних речовин – нормативно встановлена маса окремої небезпечної речовини або категорiї небезпечних речовин чи сумарна маса небезпечних речовин рiзних категорiй;
- iдентифiкацiя об'єктiв пiдвищеної небезпеки – порядок визначення об'єктiв пiдвищеної небезпеки серед потенцiйно небезпечних об'єктiв;
- потенцiйно небезпечний об'єкт – об'єкт, на якому можуть використовуватися або виготовляються, переробляються, зберiгаються чи транспортуються небезпечнi речовини, бiологiчні препарати, а також iншi об'єкти, що за певних обставин можуть створити реальну загрозу виникнення аварiї;
- аварiя на об'єкті пiдвищеної небезпеки (далi – аварiя) – небезпечна подiя техногенного характеру, що виникла внаслiдок змiн пiд час експлуатацiї об'єкта пiдвищеної небезпеки (наднормативний викид небезпечних речовин, пожежа, вибух тощо) i яка спричинила загибель людей чи створює загрозу життю i здоров'ю людей та довкiллю на його територiї i/або за його межами;
- транскордонний вплив аварiї – шкода, заподiяна населенню та довкiллю однiєї держави внаслiдок аварiї, яка сталася на територiї iншої держави;



- ризик – ступінь імовірності певної негативної події, яка може відбутися в певний час або за певних обставин на території об'єкта підвищеної небезпеки і/або за його межами;
- прийнятний ризик – ризик, який не перевищує на території об'єкта підвищеної небезпеки і/або за її межами гранично допустимого рівня;
- управління ризиком – процес прийняття рішень і здійснення заходів, спрямованих на забезпечення мінімально можливого ризику;
- декларація безпеки – документ, який визначає комплекс заходів, що вживаються суб'єктом господарської діяльності з метою запобігання аваріям, а також забезпечення готовності до локалізації, ліквідації аварій та їх наслідків.

У представленій дипломній роботі об'єктами підвищеної небезпеки можна вважати тягові підстанції системи енергопостачання, контактну мережу, їх основне та допоміжне обладнання. Для даних об'єктів актуальними є такі Нормативно-правові акти з охорони праці для транспортної галузі:

- ДНАОП 40.1-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок, затверджено наказом Держнаглядохоронпраці України від 6.10.97 за №257, зареєстровано в Мін'юст України 13.01.98 за № 11/2451, внесено зміни наказом Держнаглядохоронпраці України від 13.01.98 за № 26, зареєстровано в Мін'юст України 06.04.00 за № 213/4434.
- ДНАОП 60.1-1.48-00 «Правила безпеки для працівників залізничного транспорту на електрифікованих лініях», затверджено наказом Держнаглядохоронпраці України від 31.05.00 за № 120, зареєстровано в Мін'юсті України 08.06.00 за № 340/4561.

## 6.2 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів

Згідно з нормативними документами шкідливі фактори виробничого середовища відповідно до Гігієнічної класифікації праці за природою дії поділяють на фізичні, хімічні, біологічні та фактори трудового процесу.

На тягових підстанціях та при роботі з електрообладнанням мають місце різноманітні шкідливі та небезпечні виробничі фактори.

До шкідливих факторів, що мають фізичну природу можна віднести:

- мікроклімат: температура, вологість, швидкість руху повітря, теплове випромінювання;

- неіонізуючі електромагнітні поля і випромінювання: електростатичні поля, постійні магнітні поля (у т.ч. геомагнітне), електричні і магнітні поля промислової частоти (50 Гц);

- електромагнітні випромінювання радіочастотного діапазону, електромагнітні випромінювання оптичного діапазону (у т.ч. лазерне та ультрафіолетове);

- іонізуючі випромінювання;

- освітлення - природне (відсутність або недостатність), штучне (недостатня освітленість, пряма і відбита сліпуча блискість, пульсація освітленості).

Хімічні фактори: речовини хімічного походження, деякі речовини біологічної природи, що отримані хімічним синтезом, та/або для контролю яких використовуються методи хімічного аналізу. До хімічних можна віднести той випадок, коли на території підстанції може бути дообладнане місце під акумуляторні батареї.

Біологічні фактори не наводимо, оскільки вони не мають місця на розглядуваних об'єктах даної дипломної роботи.

До факторів трудового процесу можна віднести напруженість праці, пов'язану з емоційними навантаженнями та режимом роботи.

Розглянемо найбільш небезпечні шкідливі фактори, що мають місце на досліджуваному об'єкті.

Джерела електромагнітних полів (ЕМП) можуть бути природного та антропогенного характеру. Джерела ЕМП природного характеру не розглядаємо, оскільки робочий персонал піддається найбільшому впливу від ЕМП антропогенного характеру.

Стосовно даної роботи, джерелами антропогенного характеру є промислове електроустаткування, лінії електропередач, радіопередавальні пристрої і засоби персонального радіозв'язку, персональні комп'ютери. Електромагнітні поля мають енергію і поширюються у вигляді електромагнітних хвиль. Основними параметрами електромагнітних хвиль є довжина хвилі, частота коливань, швидкість поширення.

Вплив електромагнітних полів на організм людини. Електромагнітні поля негативно впливають на людей, які безпосередньо працюють із джерелами випромінювань, а також на населення, яке проживає поблизу джерел випромінювання. Установлено, що більша частина населення живе в умовах підвищеної активності ЕМП. Ступінь впливу електромагнітних випромінювань на організм людини залежить від діапазону частот, інтенсивності впливу відповідних

чинників, тривалості опромінення, характеру випромінювання, режиму опромінення, розмірів поверхні тіла, яка опромінюється, та індивідуальних особливостей організму. Внаслідок дії ЕМП можливі як гострі, так і хронічні ураження, порушення в системах і органах, функціональні зсуви в діяльності нервово-психічної, серцево-судинної, ендокринної, кровотворної та інших систем. Звичайно, зміни діяльності нервової та серцево-судинної системи зворотні, і хоча вони накопичуються і посилюються з часом, але, як правило, зменшуються та зникають при виключенні впливу і поліпшенні умов праці. Тривалий та інтенсивний вплив ЕМП призводить до стійких порушень і захворювань.

Внаслідок дії на організм людини електромагнітних випромінювань діапазонів (30 кГц – 300 МГц) спостерігаються: загальна слабкість, підвищена втомленість, пітливість, сонливість, а також розлад сну, головний біль, болі в області серця. З'являються роздратування, втрата уваги, подовжується тривалість мовно-рухової та зоромоторної реакцій, збільшується межа нюхової чутливості. Виникає ряд симптомів, що є свідченням порушення роботи окремих органів – шлунку, печінки, селезінки, підшлункової та інших залоз. Пригнічуються харчові та статеві рефлексії, порушується діяльність серцево-судинної системи, фіксуються зміни показників білкового та вуглеводного обміну, змінюється склад крові, зафіксовані порушення на клітинному рівні.

ЕМП низькочастотного діапазону (конкретно промислової частоти 50 Гц) викликають у працюючих порушення функціонального стану центральної нервової системи, серцево-судинної системи, спостерігається підвищена стомлюваність, млявість, зниження точності робочих рухів, зміна кров'яного тиску і пульсу, аритмія, головний біль.

### 6.3 Організаційні та технічні заходи по забезпеченню захисту працівників

У відповідності до чинного ГОСТ 12.1.009-76 ССБТ "Электробезопасность. Термины и определения" термін "Електробезпека" визначається як система організаційних і технічних заходів і засобів, що забезпечують захист людей від шкідливої і небезпечної дії електричного струму, електричної дуги, електричного поля і статичної електрики.

Система організаційно-технічних заходів щодо електробезпеки, в основному, регламентується двома міжвідомчими нормативними документами, обов'язковими для виконання на будь-якому підприємстві, незалежно від форми власності й галузевої приналежності: "Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів" (ПТЕ) та НПАОП 40.1-1.21-98 "Правила безпечної

експлуатації електроустановок споживачів" (ПБЕЕ). Обидва ці документи відповідальність за організацію безпечної експлуатації електроустановок покладають на роботодавця.

На основі ПТЕ і ПБЕЕ міністерствами і відомствами розробляються галузеві нормативні акти; на кожному підприємстві, незалежно від форми власності, розробляються нормативні акти підприємства (інструкції з експлуатації, інструкції з техніки безпеки на робочому місці і таке інше). Галузеві документи і документи на підприємствах спираються на ПТЕ і ПБЕЕ і не можуть їм суперечити.

Оскільки на працівників найбільший вплив має електромагнітне випромінювання, то у даному пункті зупинимося саме на захисті від електромагнітних випромінювань.

Для запобігання професійних захворювань, які виникають під впливом ЕМП, встановлені допустимі норми опромінення. Нормування електромагнітних випромінювань радіочастотного діапазону на робочих місцях здійснюється згідно з "Державними санітарними нормами і правилами при роботі з джерелами електромагнітних полів", затвердженими наказом МОЗ України від 18.12.2002 за № 476.

Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів встановлюють вимоги до умов праці працівників, що займаються виготовленням, експлуатацією, обслуговуванням та ремонтом обладнання, при роботі якого виникають постійні магнітні поля (далі - ЕМП) та електромагнітні випромінювання (далі - ЕМВ) у діапазоні частот від 50,0 Гц до 300,0 ГГц.

Захист персоналу від дії ЕМП досягається шляхом проведення організаційних, інженерно-технічних заходів, а також використання засобів індивідуального захисту. Основні заходи захисту від ЕМВ: це захист часом, захист відстанню, екранування джерел випромінювання, зменшення випромінювання в самому джерелі випромінювання, виділення зон випромінювання, екранування робочих місць.

Захист часом передбачає обмеження часом перебування людини в робочій зоні і застосовується, коли немає можливості знизити інтенсивність випромінювання до допустимих значень.

Захист відстанню застосовується у тому випадку, якщо неможливо ослабити ЕМВ іншими заходами, в тому числі і захистом часом. У цьому випадку звертаються до збільшення відстані між випромінювачем і персоналом. Відстань, відповідна граничне допустимій інтенсивності випромінювання, визначається

розрахунком (розрахунки інтенсивності випромінювання) і перевіряється вимірюванням.

Виділення зон випромінювання. Для кожної установки, що випромінює ЕМП вище граничне допустимих значень, повинні виділятися зони, у котрих інтенсивність випромінювання перевищує норми. Межі зон визначають експериментально для кожного конкретного випадку розміщення установки чи апаратури при роботі їх на максимальну потужність випромінювання.

Екранування джерел випромінювання або робочих місць здійснюється за допомогою відбивальних екранів (стаціонарних або пересувних). Відбивальні екрани виготовляються з металевих листів, сітки, бавовняної металовмісної тканини та ін. У поглинальних екранах використовуються спеціальні матеріали, що забезпечують поглинання випромінювання відповідної довжини хвилі. Залежно від потужності випромінювання і взаємного розміщення джерела і робочих місць конструктивне вирішення екранів може бути різним (замкнута камера, щит, чохол, штора та ін).

Екранування оглядових вікон, прикладних панелей проводиться за допомогою радіозахисного скла. Для зменшення просочування електромагнітної енергії крізь вентиляційні жалюзі останні екрануються металевою сіткою або виконуються у вигляді кінцевих хвилеводів.

Зменшення витоків енергії з фланцевих суглобових хвилеводів досягається шляхом застосування "дросельних фланців", ущільнення суглобів за допомогою прокладок, що є провідниками (фосфориста бронза, мідь, алюміній, свинець та інші метали), і поглинальних матеріалів, здійсненням додаткового екранування.

Застосування засобів індивідуального захисту слід користуватися у тих випадках, коли застосування інших способів запобігання впливу ЕМВ неможливе. До ЗІЗ належать захисні окуляри, щитки, шоломи, захисний одяг (комбінезони, халати з металовмісної тканини; окуляри з металовмісним склом). Якщо захисний одяг виготовлений з матеріалу, який містить у своїй структурі металевий дріт, він може використовуватись тільки в умовах, які унеможливають доторкання до відкритих струмопровідних частин.

Засіб захисту в кожному конкретному випадку повинен визначатись з урахуванням робочого діапазону частот, характеру робіт, необхідної ефективності захисту. На кожний засіб захисту повинна бути складена технічна документація з відміткою про призначення та діапазон частот, у яких цей засіб захисту може бути використаний, допустимої потужності розсіювання, забезпеченої ефективності

захисту за всім діапазоном частот, на який розраховано використання даного засобу.

Лікувально-профілактичні заходи. З метою попередження, ранньої діагностики і лікування порушень стану здоров'я працівників, пов'язаних з дією ЕМП, необхідно проводити попередні і періодичні медичні огляди в порядку, установленому наказом МОЗ України.

#### 6.4 Правила безпечного виконання робіт при обслуговуванні тягових підстанцій

Безпека виконання робіт в системі енергопостачання забезпечується за рахунок правильної організації, оформлення робіт і виконання організаційно-технічних заходів. Важливими етапами в забезпеченні безпеки працюючих є правильне оформлення робіт (нарядом або нарядом-допуском, розпорядженням або переліком робіт, що виконуються в порядку поточної експлуатації), виконання підготовки робочих місць, проведення цільового інструктажу бригади перед початком виробництва робіт, забезпеченні допуску до роботи і нагляду під час роботи.

Крім того проводиться ввідний інструктаж з питань пожежної безпеки згідно розробленої і затвердженої програми, що включає основні вимоги по забезпеченню дотримання вимоги Закону України «Про пожежну безпеку», знайомлять працівників також з інструкцією підприємства по пожежній безпеці і про порядок забезпечення протипожежною режиму в підрозділах і на робочих місцях дистанції електропостачання.

Контроль за дотриманням вимог з охорони праці працівниками проводиться згідно затвердженої системи оперативного контролю, яка складається з трьох ступенів. Перший ступінь оперативного контролю проводиться щодня на робочому місці керівником робіт або уповноваженим трудового колективу з охорони праці і включає:

- перевірку підготовки робочого місця, наявність, достатність і справність інструменту, захисних засобів, монтажних пристосувань і дотримання термінів їх випробувань і відповідності вимогам Правил, наявність технологічних карт на виробництво робіт, посвідчень про перевірку знань;

- наявність і стан спецодягу;
- виконання вимог правил і інструкцій при виробництві робіт;
- дотримання правил внутрішнього трудового розпорядку;

- дотримання правил безпеки при роботі з шкідливими і пожежебезпечними речовинами і матеріалами;

- справність вентиляції приточної та витяжної.

Другий ступінь оперативного контролю за станом охорони праці проводиться начальником підрозділу, старшим електромеханіком або електромеханіком і включає перевірку:

- наявність наряду (наряду-допуску) або розпорядження на роботу, що проводиться;

- достатності заходів безпеки працюючих у відповідності категорії робіт і можливості безпечного її виконання;

- правильності виконання технічних заходів, що забезпечують безпеку тих, що працюють і, особливо, достатність, і місце установки заземлень, огорожі місця робіт і т.п.;

- організації нагляду за тими, що працюють;

- наявність технологічних карт і правильності проведення роботи відповідно до неї;

- відповідності складу бригади, вказаному в наряді, достатність кваліфікації осіб для виконуваної роботи;

- наявність у членів бригади посвідчень про перевірку знань і термінів їх дії.

Третій ступінь оперативного контролю за станом охорони праці проводиться керівниками і інженерно-технічними працівниками шляхом проведення раптових перевірок працюючих бригад і комплексними комісійними перевірками стану охорони праці в кожному підрозділі в ремонтно-ревізійних цехах, згідно затвердженого графіка. При проведенні раптових перевірок працюючих бригад перевіряється:

- достатність заходів безпеки, відповідності категорії роботи і можливості її безпечного виконання;

- правильність виконання технічних заходів, що забезпечують безпеку тих, що працюють;

- організацію нагляду за тими, що працюють;

- наявність достатності, справності і придатності захисних засобів, сигнального приладдя, монтажного і інших пристосувань;

- наявність технологічної карти і правильність проведення роботи відповідно до неї;

- відповідність складу бригади, вказаному в наряді, достатність кваліфікації осіб для виконання роботи;

- наявність у членів бригади посвідчень про перевірку знань і терміни їх дії.

Виконання вимог по безпечній організації і виробництву робіт в пристроях електропостачання, забезпеченні контролю за дотриманням всіма працівниками ремонтно-ревізійного цеху вимог з охорони праці, забезпечує безпеку працівникам ремонтно-ревізійного цеху.

#### 6.5 Дії персоналу у надзвичайних ситуаціях

На тягових підстанціях у разі виникнення нештатних ситуацій працівник зобов'язаний:

- у всіх випадках виявлення обривів проводів живлення, несправності заземлення і інших пошкоджень електроустаткування, появи запаху гару негайно відключити живлення і повідомити про аварійну ситуацію головному фахівцеві з електронного устаткування;

- при спалахуванні устаткування відключити живлення і прийняти заходи по гасінню вогнища пожежі за допомогою вуглекислотного вогнегасника, викликати пожежну команду і повідомити про подію керівникові робіт.

У разі відключення електроживлення припинити роботу і доповісти керівникові. Не намагатися самостійно з'ясувати і усунути причину. Пам'ятати, що напруга може також несподівано з'явитися.

При загорянні або пожежі необхідно пам'ятати, що гасити електроустановки слід вуглекислотними вогнегасниками, щоб уникнути поразки електричним струмом.

На території, виробничих та службових приміщень забороняється:

- накопичувати горючі відходи і розташовувати сміттєприймальники та контейнери на відстані менше 20 м від споруд та будівель III, IV ступенем вогнестійкості;
- залишати неприбраним скошені трави, опалі листя;
- залишати після роботи відкритими двері, вікна, проїми в шахтах та люки у виробничих та іншого призначення приміщеннях. Ключі від приміщень повинні знаходитись у визначених місцях;
- влаштовувати з горючих будівельних матеріалів конторки, кладові, антресолі, настили, майданчики та перегородки і ін.

Дороги, проїзди та під'їзди до пожежних джерел води, будівель та споруд повинні мати тверде покриття, бути постійно вільними та утримуватися у справному стані, а в нічний час освітлюватись.

Всі види опалення та вентиляцій повинні бути в строгій відповідності з



діючими будівельними нормами та правилами.

Встановлення тимчасових печей, як правило, не допускається.

Електричні мережі та електрообладнання, яке використовується в депо, повинно відповідати вимогам діючих ПТЕ та ПТБ при експлуатації електроустановок споживачів.

Біля входу у виробниче приміщення повинен бути напис зі вказанням класу по вибуховій та пожежній небезпеці.

В усіх приміщеннях, які після закінчення роботи закриваються та не контролюються, енергосистеми повністю обезструмлюється.

Користування електронагрівальними приладами у виробничих, службових та іншого призначення приміщеннях допускається тільки у спеціально відведених та обладнаних місцях, з письмового дозволу керівника підприємства.

## ВИСНОВКИ

У представленій дипломній роботі було розглянуте важливі питання, пов'язані з енергозбереженням. Немаловажним фактором є й те, що використання енергозощаджуваних технологій дозволяє покращити й екологічний стан навколишнього середовища. Енергозбереження, як діяльність спрямована на раціональне використання енергії і природних енергетичних ресурсів. Енергозбереження є важливою ланкою у ланцюзі господарської діяльності людини. Навіть, в цивілізованих країнах, де добувають вуглеводні, переймаються проблемами енергозбереження та розвитку альтернативних джерел енергії. Для України енергетика має особливе значення, оскільки це питання пов'язане з енергонезалежністю країни.

На залізничному та міському електричному транспорті найбільша складова потенціалу енергозбереження припадає на гальмівні втрати, тобто на кінетичну енергію, яку має кожна рухома одиниця перед початком гальмування і яка в процесі гальмування витрачається на нагрівання резисторів гальмівного реостата та тертя у механічних гальмах.

У роботі було розглянуто процеси в системі електричної тяги зі змінними режимами роботи електрорухомого складу, а також визначення можливості застосування пристроїв для накопичення електричної енергії з її подальшою віддачею в тягову контактну мережу або у первинну лінію.

У першому розділі розглянуто системи тягового енергопостачання та структурно-конструктивні особливості тягових підстанцій. Зазначено, що тягові підстанції постійного струму потребують додаткового обладнання для того, щоб мати можливість приймати та передавати у первинну мережу енергію рекуперації.

У другому розділі проведено аналіз можливостей покращення енергетичних показників електротяги. У розділі показано, що перепади напруги у контактній мережі приводять до виникнення додаткових втрат. Крім того, незбалансованість енергосистеми також може приводити до виникнення струмів перетікання між підстанціями, що також приводить до втрат.

Третій розділ присвячений аналізу існуючих накопичувачів енергії та визначенню перспектив їх використання в системі енергопостачання. У розділі розглянуто вплив накопичувачів енергії на енергетичні процеси в системі, показано функціональний взаємозв'язок параметрів накопичувачів енергії і характеристик системи та визначення основних параметрів накопичувачів енергії в залежності від показників нерівномірності споживання електроенергії транспортними засобами.

У четвертому розділі розглянуті можливі варіанти застосування накопичувачів енергії у системі енергопостачання залізниць України. Запропоновано використання двох варіантів, а саме комбінації акумуляторних батарей у комплексі з молекулярними конденсаторами, та другий варіант – накопичувачів енергії на базі композиційних маховиків.

П'ятий розділ присвячений економічному обґрунтуванню використання енергозберігаючих технологій. При розгляді економічних питань було зроблено деякі припущення та спрощення, оскільки врахувати всі елементи системи не представлялося можливим. До того ж, не враховувалися економічні вигоди від зменшення негативного навантаження на навколишнє середовище.

У шостому розділі розглянуті питання, пов'язані з охороною праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях.