

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»  
Кафедра електротехніки та електроенергетики

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

### ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЗАСОБІВ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ ГІБРИДНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу,

групи ДЕА-Е23мг-1

Спеціальності : 141 Електроенергетика  
електротехніка та електромеханіка

(код і найменування спеціальності)

\_\_\_\_\_/ Максим ОЛІНІЙЧУК  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник \_\_\_\_\_/ Анатолій ТАРАСЕНКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент \_\_\_\_\_/ \_\_\_\_\_  
(підпис) (ім'я та прізвище)

*«До захисту допущено»*

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_/ Артем ЧЕРНІЮК  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль \_\_\_\_\_/ Юлія ОЛІЙНИК  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК \_\_\_\_\_/ Ігор КИРИСОВ  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально-науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія  
Кафедра електротехніки та електроенергетики  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК

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

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу  
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Максим ОЛІНІЙЧУК

1. Тема «Дослідження режимів роботи засобів акумулювання енергії гібридних транспортних засобів»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» жовтня 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Теоретичні та практичні розробки вітчизняних та зарубіжних авторів за темою роботи, що відображені у періодичних виданнях, наукових роботах, монографіях

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

ВСТУП; РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО ПИТАННЯ; РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ. РОЗДІЛ 3 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ДЛЯ ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ ТА РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ. ВИСНОВКИ

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

| Розділ | Консультант | Підпис, дата      |                     | Оцінка<br>(бали) |
|--------|-------------|-------------------|---------------------|------------------|
|        |             | Завдання<br>видав | Завдання<br>прийняв |                  |
|        |             |                   |                     |                  |

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Максим ОЛІНІЙЧУК  
(підпис) (ім'я, прізвище)

| № з/п | Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання | Термін виконання       | Позначки керівника про виконання завдань |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------|
| 1     | Визначення актуальності теми дослідження                                        | 02.10.24 –<br>05.10.24 |                                          |
| 2     | Проведення аналізу наукової літератури                                          | 06.10.24 –<br>15.10.24 |                                          |
| 3     | Виконання першого розділу дипломної роботи                                      | 16.10.24 –<br>29.10.24 |                                          |
| 4     | Виконання другого розділу дипломної роботи                                      | 30.10.24 –<br>26.11.24 |                                          |
| 5     | Оформлення пояснювальної записки                                                | 27.11.24 –<br>07.12.24 |                                          |

**Нормоконтроль**

---

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК  
(ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Сторінок тексту – \_\_\_\_\_ ; рисунків – \_\_\_\_\_; таблиць - \_\_\_\_\_;  
літературних джерел – \_\_\_\_\_.

В роботі проведено порівняльний аналіз технологій акумулювання енергії та різновидів джерел живлення.

Проведений порівняльний аналіз хімічних акумуляторів різних типів.

Проведено порівняльний аналіз приводних електричних двигунів. Визначено вентильний двигун як оптимальний за співвідношенням основних техніко-економічних показників.

Проведено порівняльний аналіз видів хімічних накопичувачів енергії. Визначено показники ефективності роботи хімічних акумуляторів. Проведено інтегральну оцінку Отримані результати доцільно застосовувати при модернізації силових установок гібридних автомобілів та при розробці нових перспективних схем гібридних силових установок.

ТЕХНОЛОГІЇ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ; ГІБРИДНИЙ АВТОМОБІЛЬ; ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ, ПРОЦЕСИ НАКОПИЧУВАННЯ ЕНЕРГІЇ, АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ; ВЕНТИЛЬНИЙ ДВИГУН; ПАЛИВНІ ЕЛЕМЕНТИ; КОНДЕНСАТОРИ; МАХОВИКИ.

## **ABSTRACT**

Pages of text – \_\_\_\_; pictures – \_\_\_\_; tables – \_\_\_\_;  
literary sources – \_\_\_\_.

The paper presents a comparative analysis of energy storage technologies and types of power sources.

A comparative analysis of chemical batteries of different types is carried out.

A comparative analysis of electric drive motors is carried out. The valve motor is determined as optimal in terms of the ratio of the main technical and economic indicators.

A comparative analysis of the types of chemical energy storage devices is carried out. The performance indicators of chemical batteries are determined. An integral assessment was carried out. The results obtained are advisable to be used in the modernization of hybrid car powertrains and in the development of new promising schemes of hybrid powertrains.

ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES; HYBRID CAR; ELECTRIC VEHICLE; POWER SOURCES, ENERGY STORAGE PROCESSES, STORAGE BATTERY; VALVE MOTOR; FUEL CELLS; CAPACITORS; FLYWHEELS.

# ЗМІСТ

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

## ВСТУП

## РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ

- 1.1 Потужність і енергія, необхідні для технології  
акумуляування енергії
- 1.2 Акумуляування енергії в гібридних автомобілях
- 1.3 Аналіз технологій акумуляування енергії в гібридних  
автомобілях та електромобілях
- 1.4 Акумуляування електрохімічної енергії
- 1.5 Акумуляування енергії електричного поля
- 1.6 Акумуляування енергії магнітного поля
- 1.7 Акумуляування кінетичної енергії

Висновки за розділом 1

## РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ

- 2.1 Продовження ресурсу літій-іонної акумуляторної батареї
- 2.2 Свинцево-кислотні акумуляторні батареї –  
сукупна вартість експлуатації
- 2.3 Натрій нікель-хлоридні акумуляторні батареї (ZEBRA),  
особливості внутрішньої будівлі і функціонування
- 2.4 Нікель-металгідридні акумуляторні батареї –  
особливості конструкції і функціонування
- 2.5 Електрохімічні процеси, що протікають усередині  
акумуляторів
- 2.6 Розрахунок реальної ємності акумулятора в залежності  
від навантаження
- 2.7 Розрахунок максимальної потужності, видаваної  
акумулятором

## 2.8 Проблеми складання батарей акумуляторних елементів

Висновки за розділом 2

## РОЗДІЛ 3 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ДЛЯ ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІ

3.1 Аналіз характеристик електроприводів на основі  
традиційних електродвигунів

3.2 Конструкції двигунів

3.3 Аналіз енергетичних режимів тягових систем  
електромобілів

Висновки за розділом 3

## РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ

4.1 Загальні засади визначення показників надійності

4.2 Розрахунок надійності конденсаторів

Висновки за розділом 4

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АКБ – акумуляторна батарея;

ГТЗ – гібридний транспортний засіб;

СЗ – система збудження

ВД – вентильний двигун;

ДПС – двигун постійного струму;

АСУ – автоматична система управління;

АОПН – автоматика обмеження підвищення напруги;

АОЗЧ – автоматика обмеження зниження частоти;

АОПЧ – автоматика обмеження підвищення частоти;

АЧР – автоматичне частотне розвантаження

БУ – блок управління;

ВДЕ – відновлюване джерело енергії;

ВП – вимірювальний перетворювач;

КЗ – коротке замикання.

## **ВСТУП**

**Актуальність** теми полягає у тому, що уряди прогресивних країн занепокоєні станом зовнішнього середовища, тому такі проекти, як зменшення шкідливих викидів автомобілів, зниження розходу нафтових та газових палив, стимулювання розвитку гібридних автомобілів та електромобілів, використання альтернативних екологічно чистих видів палива, мають національне значення. Для поліпшення екології на вулицях міста, у наш час використовуються гібридні автомобілі, що знижують викиди шкідливих речовин в атмосферу в порівнянні з існуючими автомобілями в 10...15 раз. Обмеження по використанню цих автомобілів здебільшого стосуються систем накопичення енергії. Вирішення питання збільшення обсягів накопиченої енергії дозволить значною мірою просунути технології гібридних транспортних засобів.

**Об'єкт дослідження** – процеси накопичування енергії в акумуляторах гібридних транспортних засобів.

**Предмет дослідження** – техніко-економічні показники систем накопичення енергії гібридних транспортних засобів

**Мета роботи** – визначення техніко-економічних параметрів засобів накопичення енергії в силових агрегатах гібридних транспортних засобів та визначення перспективного їх типу.

### **Завдання дослідження**

1. Проведення порівняльного аналізу технологічних систем накопичення енергії в гібридних транспортних засобах;
2. Встановлення енергетичних залежностей перетворення енергії в силових агрегатах гібридних транспортних засобів;
3. Техніко-економічний аналіз систем накопичення енергії реалізованих на базі акумуляторів різних типів;

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ

## 1.1 Потужність і енергія, необхідні для технології акумулювання енергії

Сформулюємо ідею щодо вимог, до технології акумулювання енергії в електричних та гібридних транспортних засобах, на прикладах легкових автомобілів, автобусів і вузькоколійного чи монорельсового міського транспорту.

**1.1.1 Легкові автомобілі.** Автор роботи "Energy storage requirements and optimization of sustaining power source for hybrid vehicles" заявляє, що 50...60 Вт·год /кг і 750...1200 Вт/кг відповідали б бажаним вимогам гібридного та електричного легкового автомобіля. Інші автори пред'являють більш високе питоме споживання енергії, а саме в 100 Вт·год /кг із більш низькою питомою потужністю 400 Вт/кг. Стверджують, що потрібно як мінімум 2500 циклів, і вартість не повинна перевищувати \$75/кг. До того ж, 40...80% зарядки варто досягти за 30 хвилин [2].

Розрізняють подвійний і допоміжний режими потужності. У подвійному режимі, транспортний засіб цілком працює від акумулятора. В допоміжному режимі потужності, акумулятор використовується як джерело харчування до первинного джерела енергії.

У подвійному режимі необхідно - 50...60 Вт на кілограм маси транспортного засобу, для того щоб час розгону склав 0...96 км/год за 10...12 с. Для стандартного автомобіля в США, необхідно приблизно 60...100 кВт потужності. Необхідна здатність, що акумулює, приблизно 10 кВт год.

Максимальні вимоги потужності в допоміжному режимі, ідентичні вимогам у подвійному режимі (за винятком того, що середня потужність первинного джерела енергії – віднімається). Звичайно в стандартному автомобілі, середня потужність - приблизно дорівнює 15...25 кВт, тому, максимальні вимоги потужності для вторинного джерела енергії - звичайно дорівнюють

35...85 кВт. Toyota Prius, зображена на рис. 1.1, б працює в основному в допоміжному режимі і забезпечує вторинне джерело енергії на 38.8 кВт. Це джерело - блок батарей 1.8 кВт·год з вагою системи 70 кг, з питомим споживанням енергії і потужності 26 Вт·год/кг і 554 Вт/кг, відповідно.

Інший транспортний засіб, показаний на рис. 1.1, в, Honda FCX, має водневі протонно-обмінні мембранні паливні елементи які є первинним джерелом енергії. Вони мають 78 кВт середньої потужності, при максимальній потужності, завдяки конденсаторам великої ємності, автомобіль має прийнятне прискорення. Автомобіль має паливний бак, розташований під заднім сидінням, і діапазон руху приблизно дорівнює 350 км.

**1.1.2 Автобуси** працюють із прискоренням і гальмуванням, при їхньому виробництві вони є головними претендентами для того, щоб надалі бути перетвореними в електричні або гібридні транспортні засоби.

У міських автобусах, побудованих CCM B.V. (Nuenen, Нідерланди) використовують систему маховика EMAFER як вторинне джерело енергії. Маховик акумулює 6.7 МДж (1.9 кВт·год) енергії придатної до вживання і має стабільну вихідну потужність, що змінюється від 133 кВт до 200 кВт; час передачі потужності – 40 с. Система важить 800 кг, має відповідно питому енергію і потужність 2.4 Вт·год/кг і 250 Вт/кг.

З 1988 року, Magneto-Dynamic Storage (MDS) K3 система Magnet-Motor Gmb (Starnberg, Німеччина) застосовується на дизель-електричних міських автобусах. З 1992 року, були задіяні 12 тролейбусів з цими маховиками в Базелі, Швейцарії. MDS K3 акумулює 7.2 МДж (2 кВт·год) енергії придатної до вживання. Вихідна потужність – 150 кВт, з масою системи 400 кг, що відповідає 5 Вт·год/кг і 375 Вт/кг.

### **1.1.3 Вузькоколіїний чи монорельсовий міський транспорт.**

Монорельсовий міський транспорт і потяги можуть також бути перетворені в гібридну форму. У цьому випадку, первинне джерело енергії - контактні лінії, вторинне джерело – акумулятор [3].

У пристроях рейкового міського транспорту, акумулятор може розташовуватися поза транспортним засобом і поміщений на станції. У цьому випадку, кілька транспортних засобів можуть використовувати енергію акумулятора.

У проекті - система маховика, було зроблено наступне припущення: принаймні двічі енергія транспортного засобу, що переміщається на повній швидкості повинна бути акумульована. Для здійснення цього проекту, 50.000-кілограмовий транспортний засіб повинен був бути прискорений за 10 с до 50...80 км/год і уповільнений знову за 30 с.

Це означає, що необхідна енергія складає приблизно 8.6 кВт·год, а потужність – 1 МВт. Використовуваний механізм MDS оптимізований для низьких втрат на холостому ході і високої ефективності (високого ККД) (92...95%). Дуже важлива вимога для монорельсового транспорту, такого як трамваї і метро - довговічність, тому що вони можуть мати аж до 40 циклів "зупинка і рух" за годину. Використовувана MDS система маховика досягає 14.4 Вт·год/кг і 1.5 кВт/кг.

## **1.2 Акумулювання енергії в гібридних автомобілях та електромобілях**

Відповідно до визначення, гібриди мають, принаймні, два джерела енергії, що вимагають більш низьку питому енергію акумулювання, ніж чисто електричні транспортні засоби. Питома потужність є визначальною. Енергозабезпечення - головна функція акумулювання в такому транспортному засобі.

У гібриді, первинне джерело енергії підбирається по величині середньої потужності, вторинне джерело енергії по граничній потужності. Такий підхід прийнятий для обмеження максимуму навантаження.



а



б



в

а – міський автобус; б – Toyota Prius; в – Honda FCX

Рис.1. 1– Гібридні транспортні засоби

На рис. 1.1, а зображений міський автобус, що має електродвигун - генератор, що є первинним джерелом енергії і систему акумулювання енергії маховика, що є вторинним джерелом енергії. На рис. 1.1, б, в зображені два комерційно доступних гібридних легкових автомобілі: Toyota Prius і Honda FCX. Toyota Prius має бензиновий двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) і блок акумуляторів, що є первинним і вторинним джерелом енергії, відповідно. У Honda FCX як первинне джерело енергії використовуються паливні елементи і конденсатори великої ємності, як вторинне джерело енергії [4].

### 1.3 Аналіз технологій акумулювання енергії в гібридних автомобілях та електромобілях

Розглянемо докладно технології акумулювання енергії.

Технології акумулювання енергії підрозділяють на чотири види:

- акумулювання електрохімічної енергії: батареї і паливні елементи;
- акумулювання енергії електричного поля: конденсатори на металевій плівці, алюмінієві електролітичні конденсатори і конденсатори великої ємності;
- акумулювання енергії магнітного поля: надпровідний електромагніт;
- акумулювання кінетичної енергії: махове колесо (маховик).

Ці чотири технології акумулювання енергії досягли рівня досконалості і є комерційно доступними.

## **1.4 Акумулювання електрохімічної енергії**

Акумулювання електрохімічної енергії може бути розділене на два типи: батареї і паливні елементи.

Батареї перетворюють запасену в них хімічну енергію, в електричну, зв'язану зі швидкісним режимом руху автомобіля. Батареї бувають двох типів: батареї що неперезаряджаються і перезаряджаються.

**1.4.1 Свинцево-кислотні акумуляторні батареї.** На сьогоднішній день найпоширеніша батарея типу, що перезаряджається - свинцево-кислотна, винайдена французьким доктором Гастоном Планте в 1859 році. Через примітивну конструкцію пластин і сепаратора (пластини з листового свинцю, обгорнені в полотняний сепаратор, скручені в спіраль, опускалися в 10% розчин сірчаної кислоти) відрізнялися низькою ємністю. Далі конструкція свинцево-кислотних акумуляторів неодноразово удосконалювалася за рахунок зміни структури пластин і сепаратора.

У 1880 році була запропонована технологія виготовлення намазаних електродів (на пластини наносилися окисли свинцю), у зв'язку з цим значно підвищилася ємність акумуляторів.

У 1881 році було запропоновано використовувати як електроди намазану решітку. У цьому ж році була винайдена технологія виробництва електродів зі сплаву свинцю і сурми.

З 1890 року свинцево-кислотні батареї стали випускатися в промислових масштабах. У 1957 році були винайдені батареї з гелевим електролітом, який не потребує догляду. У 1970-х роках у промисловості з'явилися також герметизовані батареї, в яких електроліт був адсорбований на сепараторі. У 1980-х з'явилися електроди зі сплаву свинцю з кальцієм для поліпшення міцності електрода при зниженні його ваги.

Типи акумуляторних свинцево-кислотних батарей по застосуванню:

- буферні акумуляторні батареї - для роботи в якості буфера у сполученні з основним джерелом харчування. Основне застосування - як резервне джерело живлення. Періоди розряду батареї в порівнянні з періодами заряду нетривалі;
- тягові батареї - для роботи в циклічному режимі - досить тривалий за часом заряд з наступним зарядом. В основному дані батареї використовуються в електротранспорті і для пристроїв з автономним живленням. Звичайно режим роботи являє собою використання батареї протягом дня, після чого вночі батарею підзаряджають;
- стартерні батареї.

Для них характерна робота з навантаженнями великою піковою потужністю (запуск двигуна внутрішнього згорання), з наступною підзарядкою. Дані батареї погано переносять тривалий розряд на величину більш 25% від загальної ємності батареї [5].

Покоління свинцево-кислотних батарей: батареї першого покоління - батареї з рідким електролітом. Бувають відкритого і закритого типів. Більшість вимагають обслуговування - доливання дистильованої води в процесі експлуатації. Маються малообслуговуванні батареї цього покоління. В основному, дані батареї використовуються в автотранспорті в якості

тягових і стартерних. Батареї другого покоління - герметизовані батареї гелію (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Герметизована батарея з гелеподібним електролітом

В основі конструкції - використання гелеподібного електроліту, отриманого змішуванням сірчаної кислоти з гелеутворювачем (звичайно двоокисом кремнію - силікагелем). Дані батареї чуттєві до низьких температур, основне застосування - використання як буферні акумулятори. Батареї третього покоління - герметизовані батареї з рідким електролітом, абсорбованим на сепараторі - AGM (Absorbed in Glass Mat), де електроліт абсорбується на скловолокні.

Батареї другого і третього покоління також називаються VRLA (Valve Regulated Lead Acid batteries) - батареї з регульованими клапанами, чи SLA (Sealed Lead Acid batteries) - герметичні свинцево-кислотні батареї (хоча називати герметичними батареї з клапаном для випуску надлишку газу не зовсім правильно, тому їх називають герметизованими).

Зображена на рис. 1.3 [6] свинцево-кислотна батарея складається з двох пластин, одна з яких складається зі свинцю, а інша з окису свинцю, який розчинено в електроліті сірчаної кислоти ( $H_2SO_4$ ). У період розряду анод і катод перетворюються в сульфат свинцю (сірчаноокислий свинець),  $PbSO_4$ . Зарядка відновлює катод в оксид свинцю й анод у свинець.

Розрядка свинцево-кислотної батареї веде до утворення водню в аноді і кисню в катоді. Причина водневого утворення полягає в тому, що потенціал

анода стає занадто високим. Це також відбувається при підзарядці акумуляторної батареї протягом короткого часу, тобто на дуже високому рівні потужності.

З'єднання водню і кисню, що відбувається у свинцево - кислотній акумуляторній батареї при перезарядженні є вибухонебезпечним.

Ця, потенційно небезпечна ситуація була частково вирішена в 1960-х роках з винаходом свинцево - кислотної батареї з регульованим клапаном (VRLA). У такій батареї, система цілком замкнута. Принцип дії полягає в наступному: катод при перезарядженні виділяє кисень, що швидко поширюється по поверхні електрода і рекомбінує.

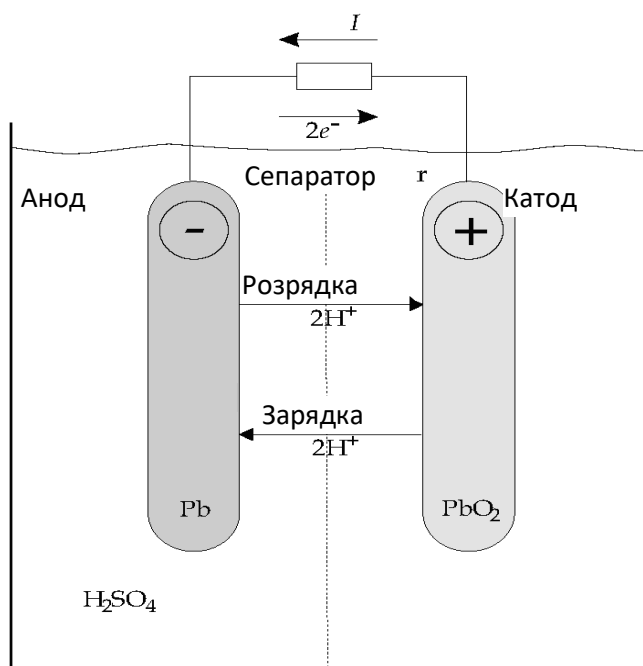


Рисунок 1.3 – Свинцево-кислотна батарея

У регульованій клапаном свинцево - кислотній батареї, кількість речовини анода більше ніж катода. Внаслідок цього, а також у силу рекомбінації кисню, анод ніколи не досягає потенціалу, при якому виділяється водень.

Гази не виділяються, загальний хімічний склад не змінюється, і вся надлишкова електрична енергія перетворюється в тепло, що розсіюється.

У дійсності, усі свинцево-кислотні батареї з регульованим клапаном виділяють відносно невеликі кількості газів, і не тільки при порушенні експлуатаційних вимог.

**1.4.2 VRLA (Valve Regulated Lead Acid batteries)** - батареї з регульованими клапанами, чи SLA (Sealed Lead Acid batteries) - герметизовані свинцево-кислотні батареї, є технічно ідентичні. В англійських ресурсах мається деяка плутанина з застосуванням даних аббревіатур, однак використання аббревіатур SLA і VRLA для свинцево-кислотних батарей, що не обслуговуються, відрізняються в них тільки областю застосування і ємністю (SLA - для батарей ємністю до 30 А·год, VRLA - для більш ємних батарей).



Рисунок 1.4 – Свинцево - кислотна батарея з регульованим клапаном

Для розуміння процесів старіння (зносу) у герметизованих свинцево-кислотних батареях необхідно пам'ятати про те, що свинцево-кислотні батареї, що не обслуговуються, розроблені з низьким потенціалом перезаряду (диктується необхідністю зниження обсягу газів, виділюваних у фазу інтенсивного газовиділення). Наслідком даного конструктивного рішення є складність вибору алгоритму заряду - оскільки батарея ніколи цілком не

заряджається, то поступово збільшується сульфатація пластин. З іншої сторони при застосуванні перезаряду зменшується сульфатація, але через конструкцію SLA батареї відбувається підвищена корозія позитивного електрода, що приводить до виходу акумулятора з ладу. У наслідок цього потрібно дотримувати рекомендацій виробника з приводу алгоритму заряду SLA.

Варто пам'ятати, що температура акумулятора сильно впливає на термін його життя. Перевищення температури, при якій акумулятор довгостроково працює, на кожні  $10^{\circ}\text{C}$  приводить до скорочення часу життя в 2 рази. Справедливо також зворотне зауваження. Також слід зазначити, що нижня температурна межа в SLA батареї також обмежена, і чим більше розряджена батарея, тим гірші її робочі характеристики при низьких температурах.

При використанні VRLA батареї необхідно, щоб всі елементи мали дуже близькі характеристики. Оскільки при використанні батареї виникає розбалансування напруг на різних елементах, необхідна процедура еквалізації акумуляторів у батареї. Еквалізація досягається шляхом збільшення напруги на кожному осередку до 2.5 В на протязі двох годин. Процедура еквалізації проводиться раз у 6 місяців, чи частіше, якщо зазначено виробником батареї.

В зв'язку з підвищеною вимогою до точності дотримання параметрів заряду для батарей, що необслуговуються, необхідно правильно вибирати зарядний пристрій. Припустима пульсація зарядного струму обмежена, звичайно в межах до 2.5% від номінальної напруги (вимірюється при навантаженні зарядного пристрою максимальним струмом для даного зарядного пристрою при відключеному акумуляторі). Це означає, що акумулятори, що необслуговуються, необхідно використовувати разом з імпульсними зарядними пристроями, що працюють на частоті в десятки кілогерців і які забезпечують постійну напругу (яка не пульсує в такт із напругою в мережі 220 В, 50 Гц).

Також бажано мати зарядний пристрій з температурним датчиком, оскільки при заряді підвищується температура акумулятора, разом з температурою росте ємність, з ростом ємності зарядний прилад може перезарядити батарею понад необхідний рівень, що приводить до ще більшого росту температури і, як мінімум, до погіршення параметрів батареї. Подібна ситуація існує і при заряді батареї при низьких температурах. Температурний датчик дозволяє зрушити параметри заряду в залежності від температури акумулятора, що дозволяє уникнути зазначеного небажаного ефекту.

Багато підтримувати батарею в зарядженому стані й уникати глибоких циклів розряду. Для нівелювання глибини розряду застосовуються більш ємні батареї. Розряд VRLA батареї менше ніж 2.1 В на акумуляторну банку приводить до сульфатації пластин. Для зменшення рівня сульфатації наприкінці заряду рекомендується застосовувати заряд постійною напругою 2.4 В на елемент протягом 2-х годин. Тривалість заряду бажано розраховувати, виходячи з 14 годин, збільшення часу заряду з 8 до 14 годин збільшує час життя батареї при дотриманні алгоритму заряду, що рекомендується виробником [7].

Для заряду деяких VRLA батарей виробники рекомендують реверсивний метод заряду - у якому зарядний пристрій, у процесі заряду, циклічно на короткий час переключається в режим розряду батареї. Використання реверсивного методу заряду дозволяє зменшити сульфатацію пластин при схоронності анода, що продовжує життя батареї.

Тягові свинцево-кислотні батареї - перші батареї для електромобілів, почали використовуватися ще в кінці XIX століття в перших електромобілях.

В даний час тягові свинцево-кислотні акумулятори виготовляються за панцирною технологією, де позитивний електрод оточений панцирною сіткою, що утримує матеріал електрода від розпаду і перешкоджає утворенню великих кристалів свинцю при зарядці (захист від замикання між пластинами, приводить до виходу з ладу акумулятора).

### Основні типи тягових акумуляторних свинцево-кислотних батарей

- PzS - панцирні акумулятори з рідким електролітом, виготовлені за німецькими стандартами DIN;
- PzB - панцирні акумулятори, виготовлені за британськими стандартами BS, по характеристиках схожі з PzS акумуляторами;
- PzV - панцирні акумулятори, що необслуговуються, у яких електроліт знаходиться в гелеподібному стані (найбільш перспективні для електромобілів та гібридних автомобілів з усіх свинцево-кислотних акумуляторів, незважаючи на більшу вагу).



Рисунок 1.5 – Тягова акумуляторна батарея, типа PzS

Існує ще багато різновидів тягових батарей, але їх обмежують параметри робітничого середовища для використання і в гібридних автомобілях використання таких батарей проблематично.

Таблиця 1.1 – Переваги і недоліки використання тягових свинцево-кислотних акумуляторів

| Переваги використання тягових свинцево-кислотних акумуляторів                                            | Недоліки використання тягових свинцево-кислотних акумуляторів                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                                        | 2                                                                                                                                                                                                                                   |
| широка поширеність технології, широкий спектр акумуляторних батарей різного призначення і їх доступність | проблема толерантності до глибокого розряду - при розряді понад 80% різко знижується тривалість життя батареї. Рекомендовані 60% розряду (при яких досягається до 1500 циклів розряду-заряду) ще більше підсилюють проблему низької |

|                                                                                                                         |                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                         | щільності енергії                                                                                                                                                   |
| низький саморозряд батареї - у 5...8 разів менше, ніж у нікель-кадмієвих батареї                                        | низька щільність енергії в акумуляторі, у зв'язку з чим вага батареї вище, ніж у більшості інших батарей                                                            |
| гарна переносимість потужностних навантажень                                                                            | при заряді губиться до 30% витраченої електроенергії                                                                                                                |
| відносна дружність до навколишнього середовища - вторинна переробка свинцево-кислотних акумуляторів добре відпрацьована | проблема обслуговування для PbS і PbB батарей - потрібно постійний контроль рівня електроліту раз у тиждень, зарядка в спеціальному добре провітрюваному приміщенні |
|                                                                                                                         | не можна залишати сильно розряджену батарею на морозі                                                                                                               |
|                                                                                                                         | важко прогнозувати вихід з ладу акумулятора                                                                                                                         |

Для свинцево-кислотних тягових батарей випускаються системи автоматичного доливання води і повітряного перемішування електроліту.

Системи автоматичного доливання води дозволяють спростити процес догляду за акумулятором, ліквідують ризик переливу і розбризкування електроліту в процесі обслуговування.

Системи повітряного перемішування електроліту знижують втрати електроенергії при заряді до 10%, зменшують нагрівання акумулятора, знижують газовиділення. При використанні систем перемішування електроліту знижується кратність обслуговування акумулятора - по заявах деяких виробників до 2...4 разів в рік.

TMF<sup>®</sup> свинцево-кислотна батарея є різновидом VRLA батареї, розвинена Bolder Technologies Corporation у США.

Батарея TMF<sup>®</sup> відрізняється від звичайної батареї VRLA тільки конструкцією. Пластини дуже тонкі (не більш 250 мкм), спіралевидні і дуже близько розташовані. Це істотно зменшує внутрішній повний опір і має низьку втрату навіть при дуже високих струмах розряду.

Ще одним типом батареї, заснованої на свинцево-кислотному хімічному складі, є біполярний свинцево-кислотний акумулятор. Одна з таких систем була розвинена TNO у Нідерландах [9].

Існують нікель - кадмієві, нікель - металгідридні, нікель - цинкові, нікель - залізні, натрій - сірчані, літій-іонні, літій - сірчані й інші види батарей.

#### ***1.4.3 Свинцево-титанові кислотні акумуляторні батареї з біполярними електродами*** - майбутнє тягових батарей для електромобілів.

Свинцево-кислотні акумулятори - першовідкривачі в ряді вторинних хімічних джерел струму. Уже біля півтора століть свинцево-кислотні акумулятори служать електромобілебудівництву.

Здавалося, що всі нюанси виробництва свинцево-кислотних акумуляторів уже вивчені і не має чого чекати нового від цієї старої технології. І, незважаючи на тривалий період затишку після винаходу герметичних свинцево-кислотних акумуляторів, на початку 1990-х років з'явилася нова надія електромобілістів на такі ж дешеві і, у той же час, більш ємні акумуляторні батареї. Дана технологія - технологія акумуляторних батарей з біполярними електродами.

Біполярні електроди можуть застосовуватися не тільки для свинцево-кислотних батарей, ця технологія може використовуватися для об'єднання в батарею різних типів акумуляторів. Однак перші комерційні батареї з біполярними електродами були анонсовані в 2006 році фірмою Altraverda на основі свинцево-титанових біполярних електродів.

Ідея біполярних батарей полягає в том, що при з'єднанні акумуляторних елементів у "стринг" (з англійської string - нитка) як струмопровідні перемички між банками використовується з'єднання між собою різнойменних електродів сусідніх елементів через струмопровідну стінку. Спочатку йде електрод однієї полярності, він упритул примикає до струмопровідної стінки, що з'єднує сусідні банки, потім до цієї ж стінки примикає електрод протилежної полярності із сусідньої банки. Завдяки поєднанню електродів різної полярності, даний об'єднаний електрод

називається біполярним, а батарея, створена за даною технологією – біполярною [8].

Для біполярних батарей фірми Altraverda були використані струмопровідні перегородки з кераміки, що містять оксиди титана  $\text{TiO}_2$  і  $\text{TiO}$  (Ebonex<sup>®</sup> Technology). Тому ці батареї справедливо називати свинцево-титановими. За словами виробника, кераміка на основі оксиду титана відрізняється досить гарною струмопровідністю і високою корозійною стійкістю, що обумовило його вибір як роздільник у біполярному електроді.

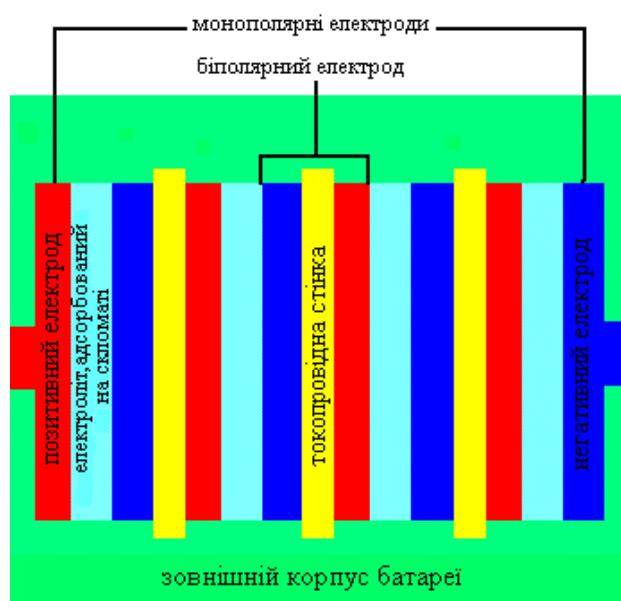


Рисунок 1.6 – Схема батареї з біполярними електродами

Дана технологія обіцяє нам такі вигоди: по-перше, зменшується кількість електроліту в акумуляторі за рахунок того, що електроліт локалізується тільки між електродами в акумуляторній банці, не омиває електроди з усіх боків; по-друге - біполярний електрод є більш міцним, що дозволяє збільшити кількість активної маси, яка бере участь в електрохімічних процесах; по-третє, за рахунок великої площі струмопровідної стінки, зменшується внутрішній опір батареї.

По заявах виробника виходить значний ріст основних параметрів у свинцево-кислотних батареях з біполярними електродами в порівнянні з іншими типами свинцево-кислотних батарей. Оцінні дані зведені в таблицю.

Таблиця 1.2 – Порівняльні параметри свинцево-кислотних батарей

| Одиниця вимірювання | Звичайні батареї з монополярними електродами | “Біполярні” батареї з використанням Ebonex <sup>®</sup> Technology |
|---------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Вт·год/кг           | 25...35                                      | 40...60                                                            |
| Вт·год/л            | 50...60                                      | 100...120                                                          |
| Вт/кг               | 80...150                                     | 250...320                                                          |
| Вт/л                | 300...400                                    | 700...1000                                                         |

Для технології свинцево-кислотних батарей у наявності явний прогрес. При такому темпі розвитку технологій найближче майбутнє електромобілів вимальовується усе більш чітко.

**1.4.4 Літій - іонні акумулятори** є дуже перспективними для використання як тягові батареї для гібридних автомобілів та електротранспорту. Технологія виробництва літі-іонних акумуляторів постійно удосконалюється, удосконалюються характеристики, зменшується вартість виробництва акумуляторів. Так що, можливо, літій-іонні акумулятори можуть стати основним джерелом харчування електромобілів у майбутньому [2].

Перші експерименти з літієвими акумуляторами відносяться до 1912 року, але перші серійно зроблені літієві батареї з'явилися в 1970-х роках, вони були що неперезаряджаються.

У середині 1980-х з'явилися серійні літієві акумулятори, але їхнє використання було обмежено через високу вибухонебезпечність - при циклічності на літієвому аноді утворювалися дендритоподібні кристали літію, що проростали до катода і провокували внутрішнє елементне коротке замикання і вибух через перегрів, що запускав хімічну реакцію між літієм і органічним електролітом.

З 1991 року почалося комерційне використання літій-іонних акумуляторів, виготовлених фірмою Sony. У цих акумуляторах використовувався кобальтат літію ( $\text{LiCoO}_2$ ), який був адсорбований на коксових аноді і катоді. Як електроліт використовувалася сіль літію в органічному електроліті. При дотриманні умов розряду/заряду дані елементи досить безпечні в плані вибуху.

Наприкінці 1990-х років з'явилося багато різновидів на ринку Li-ion акумуляторів - стали вироблятися батареї на базі кобальтатов літію на графітових електродах, з'явилися батареї на основі більш дешевої хімії -  $\text{LiNiO}_2$ ,  $\text{LiMnO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiFePO}_4$ . Також з'явилися акумулятори з полімерним електролітом і літій - полімерні акумулятори для використання в мініатюрній електроніці.

Основними перевагами Li-ion батарей є: найбільша щільність енергії з усіх різновидів акумуляторів - як об'ємна, так і вагова; напруга харчування на елементі - 3.6 В, що в 3 рази вище, ніж у NiMH і NiCd акумуляторів і майже в 2 рази вище, ніж для свинцево-кислотних акумуляторів; швидкий процес заряду батарей - до 90% ємності за 30...40 хв.; високий показник ресурсу - понад 1000 циклів розряду/заряду; низький показник саморозряду - до 5% на місяць; дружність навколишньому середовищу - можуть бути утилізовані без попередньої переробки.

Недоліками Li-ion батарей є: можливість вибуху при механічному ушкодженні чи при перезарядженні акумулятора; досить швидке старіння акумулятора - більшість акумуляторів різко знижують свої характеристики при збереженні або при використанні понад 5 років; висока вартість, але над цим параметром посилено працюють китайські виробники.



Рисунок 1.7 – Електромобіль Tesla Roadster

Зображений на рис. 1.7 електромобіль Tesla Roadster є втіленням самих передових технологій, новітніх досягнень автобудування і інноваційних рішень. Компанії Tesla Motors вдалося створити електродвигун з вражаючими характеристиками: його діаметр всього лише 28 см, довжина – 33 см, а заявлений ККД перевищує 90%. В Tesla Motors застосовані літій-іонні батареї з масивом з майже семи тисяч осередків, розбитих на одинадцять секторів. Головною перевагою подібного підходу є надійність – вихід з ладу одного-двох секторів практично не позначиться на характеристиках машини. В Tesla Motors затверджують, що залежно від умов їзди повністю заряджений акумулятор забезпечує до 400 км пробігу. Заряджання від звичайної електромережі займає приблизно три з половиною години. За станом батарей безперервно стежить бортова комп'ютерна система. Сенсори відстежують температуру, вогкість і інші параметри. У разі потенційної небезпеки вся система буде миттєво знеструмлена. Ресурсу батарей повинно вистачити на 160 тисяч кілометрів пробігу, після чого доведеться навідатися на спеціалізовану технічну станцію, щоб замінити акумуляторний блок, а це коштує дуже дорого.

**1.4.5 Натрій нікель-хлоридні акумуляторні батареї (ZEBRA)** були винайдені наприкінці 1980 років спеціально для потреб електротранспорту. Акумулятори ZEBRA є продовжувачами ідеї гарячих натрій-сірчаних

аккумуляторів. Основною причиною відмовлення від натрій-сірчаних аккумуляторів на користь натрій нікель-хлоридних з'явився факт високої корозії керамічного твердого електроліту в натрій сірчаних аккумуляторах у процесі циклічності, що приводило до малого терміну життя батарей.

В даний час аккумулятори ZEBRA виробляються швейцарською компанією MES DEA, і доступні для покупки. Про інших виробників аккумуляторів ZEBRA відомо мало, і їхня продукція поки недоступна на ринку. Основним розроблювачем натрій нікель-хлоридних аккумуляторів є Beta Research & Development Ltd. у Великобританії.

Для гібридних автомобілів потрібні аккумуляторні батареї з високою питомою ємністю і низькою ціною за кВт·год запасеної електроенергії. Також бажано, щоб батареї мали великий термін експлуатації і велику кількість циклів заряду/розряду, а також могли швидко заряджатися. Аккумулятори ZEBRA потенційно можуть перевершити основні, використовувані в даний момент, батареї для гібридних автомобілів за всіма показниками.

У натрій нікель-хлоридних аккумуляторах використовуються дешеві складові - розплавлений натрій, хлорид нікелю (II), керамічний твердий електроліт і розплавлений алюмохлорид натрію ( $\text{NaAlCl}_4$ ) як рідкий електроліт. Для роботи даного аккумулятора необхідно підтримувати внутрішню температуру на рівні 270...350°C. Тому аккумуляторні батареї ZEBRA мають у своєму складі нагрівач, повітряний охолоджувач і упаковані в сталевий двохстінний термоізолюючий корпус, між стінками якого мається вакуумний прошарок [8].

Необхідність термоізоляції диктує великий розмір самої батареї ZEBRA: типовий представник - Z5C - важить 195 кг і запасє 16.8 кВт·год електроенергії. Чим більше обсяг, тим менше питома площа для розсіювання тепла, тим менше потрібно енергії для підтримки робочої температури на рівні 300°C. Розміри аккумуляторної батареї ZEBRA диктують її застосування - електротранспорт.

Для правильної роботи акумуляторної батареї ZEBRA необхідна розумна система керування батареєю, і вона там є. Система підтримує внутрішній стан батареї на оптимальному рівні, автоматично відключає харчування при відсутності навантаження й у критичних ситуаціях (мається убудований датчик несправності). Уся система може керуватися через послідовний порт комп'ютера з Windows. Доступна не тільки функція моніторингу стану батареї в реальному часі, але і можливість тюнінга параметрів акумуляторної батареї під конкретну область застосування. Подібна система, гарна тим, що MES DEA надає вилучену підтримку для своїх акумуляторів ZEBRA - кваліфікований інженер зі Швейцарії може через механізм вилученого помічника Windows допомогти настроїти акумуляторну батарею в будь-якій частині світу, де є доступ в Інтернет.

Завдяки тому, що твердий електроліт, що розділяє анод і катод, є ізолятором, батареї ZEBRA мають нульовий рівень саморозряду. Іронія ситуації полягає в тому, що на підтримку робочої температури натрій-нікель-хлоридного акумулятора Z5C контролеру необхідно витратити від 100 до 120 Вт енергії, що приводить цілком заряджений акумулятор до повного розряду за тиждень.

Недолік акумулятора ZEBRA - висока температура, у випадку з електромобілем може служити також і перевагою - при навантаженні виділяється додатково до 10% теплової енергії від споживаної потужності, що для зимових умов означає до 600...1000 Вт тепла для малого електромобіля нешкідливо для дальності пробігу. Ті ж 100 Вт тепла при стоянці забезпечать мінімальний обігрів сидінь і салону в зимових умовах.

Безпека акумуляторів ZEBRA не нижче, ніж у бака з бензином звичайного автомобіля з ДВЗ. Крім подвійного термоізолюючого корпусу, кожен акумуляторний елемент у батареї має власну сталеву оболонку. При краш-тестах батареї ZEBRA витримували удар на швидкості 50 км/год об сталевий стовп, при цьому в корпусі утворювалася вм'ятина на 15 см, і були тріщини на 2/3 зовнішнього корпусу. Після зіткнення температура усередині

батареї досягала  $700^{\circ}\text{C}$ , у результаті поглинання кінетичної енергії і реакції між хлоридом нікелю і натрієм. Однак через те, що в процесі цієї реакції не виникає газо- і паротворення (на відміну від натрій-сірчаних акумуляторів), гарячі продукти реакції (поварена сіль і нікель) не виходили за межі корпусу і зовнішня поверхня залишалася терпимо гарячою. Також проводилися тести нагрівання батареї - облита бензином і підпалена, батарея ZEBRA спокійно витримувала 2 години перебування у вогні. Небезпека термічної поразки виникає у випадку, коли зовнішній корпус руйнується настільки, що акумуляторні елементи випадають назовні. Однак така ситуація приведе до загибелі людей, які знаходяться в автомобілі, оскільки, на дуже міцну батарею усередині корпусу гібридного автомобіля впливає сила, достатня для повного руйнування цього корпусу. З огляду на те, що безпека сучасних автомобілів висока настільки, що люди часто переносять удар автомобіля об ліхтарний стовп на швидкості 100 км/год без серйозних ушкоджень, то батареї ZEBRA при такому ударі взагалі нічого не загрожує.

Натрій нікель-хлоридні акумуляторні батареї ZEBRA є перспективними для гібридного і електротранспорту, для чого вони і були розроблені. Уже зараз вони використовуються в електробусах, яхтах, деяких дорожніх електромобілях.

При використанні акумуляторів ZEBRA для електромобіля реально досяжний пробіг на одній зарядці в 150 км. Тривалий термін життя і гарні показники циклічності ставлять натрій нікель-хлоридні акумулятори на одне з перших місць серед існуючих акумуляторів. На даний момент єдиною істотною перешкодою є ціна даного типу батарей. Як тільки відбудеться зниження ціни одного кіловат-часу ємності батареї до рівня 300 USD, що реально досягне (собівартість виробництва складає менше 150 USD за 1кВт·ч), то гібридні автомобілі та електромобілі середнього радіуса дії стануть широко використовуваною реальністю. Залишається тільки надіятися, що натрій нікель-хлоридні акумулятори не повторять долю нікель-металгідридних побратимів (Texaco/Chevron викупила патент на нікель-

металгідридні батареї в General Motors і заборонила виробництво великогабаритних елементів до кінця 2014 року - тоді закінчується термін патенту, це привело до відкидання на вихідні позиції використання свинцево-кислотних акумуляторів для серійних недорогих гібридних автомобілів та електромобілів).

Таблиця 1.3 – Переваги і недоліки NiNaCl батарей

| Переваги NiNaCl батарей                                                                                                                                                         | Недоліки NiNaCl батарей                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                                                                                                               | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Висока питома ємність, в порівнянні з літій-іонними акумуляторами                                                                                                               | Низька щільність потужності (але це не дуже великий недолік, тому що через велику кількість елементів Z5C ZEBRA може видавати до 37 кВт потужності)                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Зручність керування, завдяки інтелектуальній системі керування батареї                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Низька вартість і широка доступність основних матеріалів акумулятора                                                                                                            | Необхідність підтримки високої робочої температури усередині батареї диктує висока витрата енергії (близько 100 Вт для Z5C ZEBRA)                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Висока безпека                                                                                                                                                                  | Акумулятори ZEBRA витримують не більш 50 циклів нагрівання/охолодження                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Відсутність потреби в додатковому обігрівачі в зимових умовах                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Великий час життя акумулятора - понад 1000 повних циклів заряду/розряду і понад 7 років активної експлуатації (такі характеристики далеко не в кожного серійного акумулятора)   | Ціна кожного кіловату на годину ємності батареї складає на сьогоднішній день близько 650 USD (при заявленій собівартості кіловат-часу при багатосерійному виробництві нижче, ніж 150 USD) - цей недолік дуже високий, тому що із-за нього електромобіль з батареями ZEBRA може тільки бути на рівних за ціною експлуатації з бензиновими автомобілями (в Європі, де дорого обходиться бензин і екологічні податки) |
| Висока толерантність до виходу з ладу окремих акумуляторних елементів у батареї (через дуже низький опір, елемента, який вийшов з ладу батарея безболісно витримує до 5% утрат) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Великий вольтаж (278.6 В чи 557 В для Z5C ZEBRA батареї)                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Висока екологічна безпека - основні компоненти натрій нікель-хлоридних акумуляторів мало екологічно небезпечні                                                                  | Для розігріву холодної батареї і приведення її в робочий стан необхідно не менш доби                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

**1.4.6 Нікель-кадмієві акумуляторні батареї.** Винайдені шведом Вальдмаром Юнгнером (Waldmar Jungner) у 1899 році. У ті часи матеріал для нікель-кадмієвих акумуляторних батарей був дорогим у порівнянні з іншими акумуляторами і використання цього типу батарей обмежалося невеликим числом місць застосування. Початок герметичним нікель-кадмієвим батареям поклало вишукування в 1932 році, розташування активного матеріалу усередині пористого нікелевого електрода.

З 1947 року стали серійно випускатися герметичні нікель-кадмієві батареї, які не сильно відрізняються від сучасних. У цих батареях газу, що утворюється при зарядці, рекомбінують і не виходять за межі батареї, що виключає необхідність спостереження за рівнем і періодичного доливання електроліту.

Для нікель-кадмієвих батарей переважніше швидка імпульсна зарядка, ніж повільна постійним струмом. Ці батареї можуть видати велику потужність, що визначає їхній вибір для такого потужнісного навантаження, як двигун гібридного автомобіля. Нікель-кадмієві батареї єдиний тип батарей, що витримує повну розрядку при великому навантаженні без яких-небудь наслідків. Інші типи батарей вимагають неповної розрядки при відносно невисоких потужнісних навантаженнях.

Для нікель-кадмієвих батарей не є бажаною тривала зарядка при епізодичному невеликому навантаженні. Періодична повна розрядка необхідна для них, при відсутності повної розрядки на електродах утворюються великі кристали металу (що приводить до прояву так названого “ефекту пам'яті”) - акумулятор стрибкоподібно утрачає свою ємність. Для довгої й ефективної роботи NiCd батарей необхідні цикли обслуговування батареї - повна розрядка з наступною повною зарядкою, виходячи з більшості рекомендацій - раз на місяць, у крайньому випадку раз у 2...3 місяця.

На даний момент є варіанти заміни кадмієвого електрода на менш токсичні компоненти, наприклад, нікель-металгідридні батареї (але в

порівнянні з нікель-кадмієвими батареями вони несуть меншу ємність і щільність потужності і коштують дорожче).

Переваги NiCd батарей:

- швидкий і простий процес заряду, навіть після тривалого збереження;
- велика кількість циклів заряду/розряду при дотриманні правильного догляду - більш 1000 циклів;
- гарна переносимість великого потужнісного навантаження;
- можливість тривалого збереження - до 5 років;
- проста можливість транспортування - авіакомпанії перевозять без усяких попередніх умов;
- гарна схоронність показників при низьких температурах;
- прощають повний розряд - по цьому показнику NiCd акумулятори найбільш надійний вибір із всіх існуючих;
- економічно вигідні - представляють одну з найменших цін на один цикл заряду/розряду.

Недоліки NiCd батарей:

- відносно низька щільність енергії;
- ефект пам'яті - NiCd батареї вимагають періодичного тренування (циклу повного розряду/заряду акумулятора);
- компоненти батареї токсичні для навколишнього середовища і переробка цих батарей скрутна, через що багато країн обмежують їхнє використання;
- відносно високий саморозряд батарей.

#### **1.4.7 Нікель-металгідридні акумуляторні батареї (рис.1.8).**

Дослідження в області нікель-металгідридних батарей почалися в 1970 роках як удосконалювання нікель-водневих батарей, оскільки вага й обсяг нікель-водневих батарей не задовольняли виробників (водень у цих батареях знаходився під високим тиском, що вимагало міцного і важкого сталевого корпусу). Використання водню у виді гідридів металів дозволило знизити вагу й обсяг батарей, також знизилася і небезпека вибуху батареї при перегріві.

Починаючи з 1980 років була істотно поліпшена технологія виробництва NiMH батарей і почалося комерційне використання в різних областях. Успіху NiMH батарей сприяла збільшена ємність (на 40% у порівнянні з NiCd), і використання матеріалів, придатних до вторинної переробки.

NiMH батареї можуть витримувати менші потужностні навантаження в порівнянні з NiCd батареями. Використання при високому навантаженні і збереження при підвищеній температурі веде до зменшення терміну життя батареї.



Рисунок 1.8 – Нікель-металгідридна акумуляторна батарея

Переваги нікель-металгідридних батарей:

- велика ємність на 40% і більше, ніж звичайні NiCd батареї;
- менша виразність ефекту “пам'яті” - цикли обслуговування батареї можна проводити в 2...3 рази рідше;
- проста можливість транспортування - авіакомпанії перевозять без усяких попередніх умов;
- екологічно безпечні - можлива переробка.

Недоліки нікель-металгідридних батарей:

- обмежений час життя батареї - звичайно близько 500 циклів повного заряду/розряду (хоча в залежності від режимів роботи можуть бути розходження);
- ефект пам'яті - NiMH батареї вимагають періодичного тренування (циклу повного розряду/заряду акумулятора);

- відносно малий термін збереження батарей - звичайно не більше 3 років, після чого губляться основні характеристики. Збереження в прохолодних умовах при частковому заряді в 40% сповільнюють процес старіння батарей;
- обмежена потужнісна ємність - при перевищенні припустимих навантажень зменшується час життя батарей;

**1.4.8 Цинк-повітряні паливні батареї** – майбутнє джерел току для гібридних автомобілів. Зараз йде активна пропаганда цинк-повітряних батарей для електротранспорту. Дані батареї плануються до використання в електробусах, що курсують на Олімпіаді в Пекіні.

Цинк-повітряні елементи харчування відомі давно, область застосування цих елементів - використання в слухових апаратах. Перевагами, що дозволили зайняти цю нішу цинк-повітряним первинним хімічним джерелам струму, з'явилася висока ємність і тривалий термін збереження в неактивованому стані. Будова цинк-повітряних батарей, що перезаряджаються механічно, проста: у ємність, розділену на відсіки вставляються незнімні електроди, на яких адсорбується і відновлюється кисень повітря і знімні касети, заповнювані гранулами цинку (видатковий матеріал анода). Як електроліт використовується гідроксид калію, між позитивним і негативним електродами прокладається сепаратор. Для початку використання цинк-повітряного елемента виймається пробка, що перешкоджає доступу повітря усередину. У результаті окислювання цинку до оксиду цинку з'являється ЕРС, яка дорівнює 1.65 В.

Після вироблення активного матеріалу цинк-повітряну батарею потрібно зарядити - замінити гранули окисленого цинку в анодній касеті на свіжий цинк. Даний процес нагадує заправлення паливом автомобілів із ДВЗ - для електротранспорту з цинк-повітряними батареями потрібна розвинена структура цинкозаправок, цинковозів і цинк-переробних підприємств, на яких електрохімічними методами відновлюється оксид цинку з відпрацьованих анодів, тому справедливо назвати цинк-повітряні елементи "паливними".

Причиною використання такої складної технології є те, що цинк-повітряні елементи харчування мають щільність енергії в 2...2.5 рази більшу, ніж у найбільш ємних з розповсюджених на сьогоднішній час - літій-іонних акумуляторів.

Отже, можна підвести підсумки. Незважаючи на всю привабливість цинк-повітряних елементів через їх високу питому ємність, цинк-повітряні батареї мають декілька дуже великих недоліків, що не дозволять широко використовувати дану технологію.

Таблиця 1.4 – Переваги та недоліки цинк-повітряних паливних елементів

| Переваги цинк-повітряних паливних елементів                                                                                 | Недоліки цинк-повітряних паливних елементів                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Висока щільність енергії - у 2...2.5 рази вище, ніж у літій-іонних акумуляторів                                             | Високий рівень саморозряду розгерметизованої батареї через пряме окислювання цинку киснем повітря в лужному середовищі                                                                               |
| Відносна дешевина і поширеність цинку в промисловості                                                                       | Необхідність створення розвиненої структури цинкозаправочних станцій і підприємств по переробці цинку                                                                                                |
| Високий показник стабільності напруги - при достатньому доступі повітря протягом розряду на 80% зберігається напруга 1.65 В | Складність з оплатою енергії, оскільки при даній організації процесу буде завжди залишатися відсоток невитраченої активної маси. Тобто завжди буде оплачуватися повне заправлення "порожнього бака". |
| Екологічність і прозора схема рециклірування відпрацьованого цинку                                                          | Незважаючи на те, що могло бути витрачене, наприклад, 40% активної маси, але, щоб доїхати до наступної заправки, необхідно бути зарядженим на 85% все одно прийдеться змінювати всю батарею [8]      |

**1.4.9 Паливні елементи.** Паливні елементи відносяться до хімічних джерел струму. Вони здійснюють пряме перетворення енергії палива, в електрику, минаючи малоефективні, що йдуть з великими втратами, процеси горіння. Це електрохімічний пристрій у результаті високоефективного

"холодного" горіння палива безпосередньо виробляє електроенергію. Принцип воднево-кисневого паливного елемента представлений у 1839 році Grove в Англії.

Паливні елементи - не електрохімічні пристрої акумулювання енергії в тому же сенсі, що і батареї, тому що вони не акумулюють їхнє власне паливо і речовину, яка окисляється.

На рис. 1.9 [6] зображений мембранно-іонний паливний елемент, що є одним з безлічі різних типів паливних елементів, що піддалися розвитку й удосконалюванню. Анод і катод відділені іонообмінною мембраною товщиною приблизно 1 мм, що дозволяє проходити позитивним іонам водню ( $H^+$ ), і не дозволяє проходити молекулам нейтрального кисню ( $O_2$ ). Електрони, відділені мембраною, що покрита каталізатором, що має  $2H_2$ , представлені у наступній хімічній реакції



у той час як реакція в катоді поєднує електрони,  $H^+$ -іони і подаваний кисень, що приводить до побічних продуктів, утворюється вода



Таким чином, енергія, перетворена в електричну форму іонно-мембранним паливним елементом, дорівнює

$$E_{fc, \text{електр}} = neV_{fc}, \quad (1.3)$$

де  $n$  - число електронів;

$e$  - заряд електрона;

$V_{fc}$  - електрорушійна сила елемента, 1.23 В.

Більш ефективна робота паливних елементів спостерігається при безупинній роботі, вони не можуть швидко спрацювати при циклічному навантаженні. Внаслідок цього, вони не ідеально підходять, як джерело харчування. Це розглянуто в комерційно доступному Honda FCX рис. 1.1, в. В цьому автомобілі, основне джерело енергії - паливні елементи.

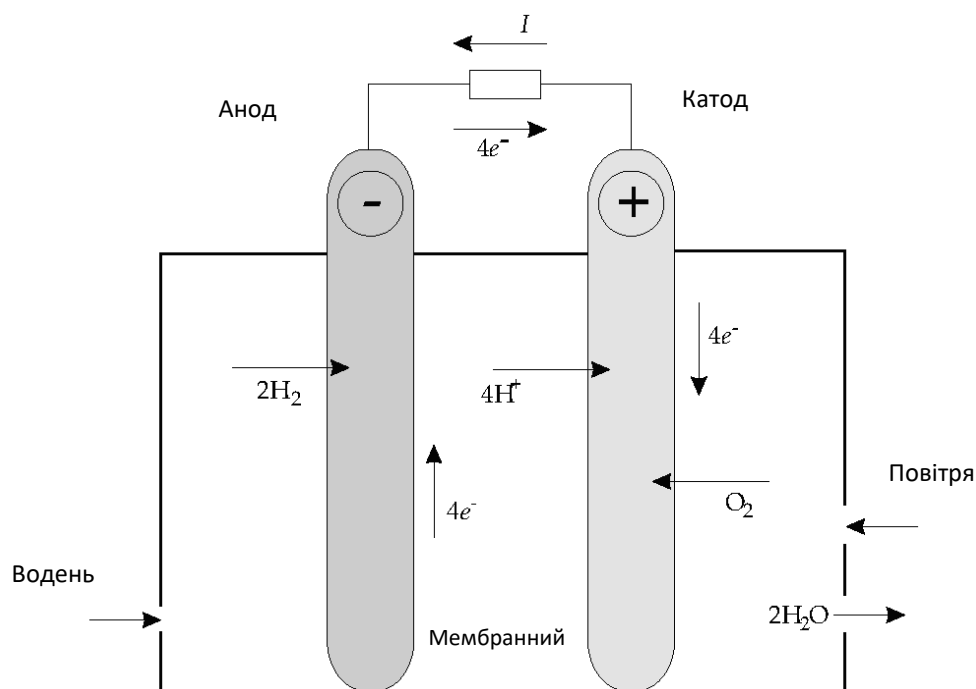


Рисунок 1.9 – Іонно-мембранний паливний елемент

В середині березня 2008 року в Японії під патронатом Міністерства економіки, торгівлі і промисловості пройшов семінар під назвою Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project (JHFC). На цьому заході виказували свою думку автомобілебудівники і учені з провідних університетів. Основною проблемою збору сталі автомобілі на водневих паливних елементах (FCV). Представники METI, Toyota, Nissan, Honda, Nippon Oil і Tokyo Gas говорили про те, що 2015 рік повинен стати ключовим для автомобілів з живленням подібного типу. В порівнянні з іншими “зеленими машинами”, що працюють на електриці або гібридних двигунах, FCV ще далекі від того, щоб стати комерційним товаром. Фахівцям ще потрібно допрацювати надійність

пристроїв, понизити їх вартість і продумати всю водневу інфраструктуру (заправні станції, питання, пов'язані з їх розміщенням). Фахівці обіцяють розв'язати ці і багато інших проблем до 2015 року, після чого і буде ухвалено рішення про початок серійного виробництва подібних пристроїв.

## 1.5 Акумуляування енергії електричного поля

**1.5.1 Конденсатори на металевій плівці.** Ємнісний плоскопаралельний конденсатор визначається формулою

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A_e}{d}, \quad (1.4)$$

де  $\epsilon_r$  - відносна діелектрична проникність;

$\epsilon_0$  - діелектрична постійна вакууму;

$A_e$  - ефективна щільність однієї з пластин;

$d$  - діелектрична щільність.

Енергія, яка акумульована в електричному полі конденсатора, дорівнює

$$E_e = \frac{1}{2} CV^2, \quad (1.5)$$

де  $V$  - напруга між пластинами.

Конденсатори на металевій плівці мають дуже високу питому потужність, звичайно від 100 кВт/кг до 1 МВт/кг, та дуже низьке споживання питомої енергії, тобто нижче 0.1 Вт·год/кг [10]. Причиною цього служить те, що ефективні щільності пластин не є дуже великими, тому що вони, власне кажучи, є плоскопаралельною системою. Повний час розрядки плоскопаралельних конденсаторів змінюється в межах від мікросекунд до мілісекунд. Однак, низька кількість збереженої енергії, робить конденсатори на металевій плівці корисними тільки для обмеженого числа пристроїв.

**1.5.2 Алюмінієві електролітичні конденсатори.** У наші дні дуже поширені електролітичні конденсатори через їх високу ємнісну щільність ( $F/m^3$ ), у порівнянні з конденсаторами на металевій плівці. Їх називають електролітичними конденсаторами, тому що діелектрик сформований електролітичним процесом. Найпоширенішим типом електролітичного конденсатора в промисловості є алюмінієвий електролітичний конденсатор, існує кілька типів таких конденсаторів: танталові, ніобійові, цирконієві і цинкові. В алюмінієвому електролітичному конденсаторі, діелектриком є окис алюмінію ( $Al_2O_3$ ).

На підставі (1.4) ємність може бути збільшена, якщо збільшити ефективну щільність  $A_e$ , при збільшенні  $\epsilon_r$ , і зменшенні  $d$ . Діелектрична міцність оксидного шару в алюмінієвому електролітичному конденсаторі обмежує напругу.

Наприклад, 800 В, 680  $\mu F$  алюмінієвих електролітичних конденсаторів акумулюють тільки 217.6 Дж енергії, при повній зарядці. Електроліт також зношується згодом, і типовий конденсатор, використовуваний в автобусі постійного струму в промисловості буде звичайно служити протягом 2...3 років, перш, ніж буде потрібна його заміна.

**1.5.3 Конденсатори великої ємності (суперконденсатори).** У 1853 році, Гельмгольц помітив, що, коли напруга підведена до вугільного електрода встановленого в провідній рідині, відсутнє безупинне протікання струму, поки не досягнута визначена гранична напруга.

Це принцип, на підставі якого базуються конденсатори великої ємності. Хоча конденсатор великої ємності - електрохімічний пристрій, він акумулює енергію електростатично, а ні електрохімічно як акумуляторна батарея, тому що ніякі хімічні реакції не протікають у механізмі накопичування.

Зовнішнє електричне поле викликає нагромадження іонів у рідині дуже тонким шаром, обмежуючи електрод, що ефективно поляризує електроліт. Прикладена напруга на позитивному електроді притягає негативні іони в

електроліті, у той час як напруга на негативному електроді притягає позитивні іони в електроліті. Це створює два шари поділу зарядів, один на позитивному і на негативному електроді, звідси назва здвоєний конденсатор. Використовуються електроди, які можуть мати площу поверхні від  $10^4$  мм<sup>2</sup>/г. Напруга пробою електроліту конденсаторів великої ємності низька (нижче 3 В), що обмежує їхнє практичне застосування і знижує необхідну потужність.

Перші практичні результати наукових праць, зв'язаних із застосуванням суперконденсаторів відносяться до середини 20 століття, коли з'явилося широке коло матеріалів, що дозволяють практично реалізувати ідею суперконденсатора. З іншого боку, розробку нових типів конденсаторів викликала потреба промисловості в могутніх, джерелах струму, що заряджаються швидко, з великим ресурсом.

Роботи з поліпшення властивостей електрохімічних конденсаторів привели до появи в кінці 20 століття суперконденсаторів з ємністю до 10 Вт·год/кг, що дозволило використовувати суперконденсатори для нестатків гібридного й електро- транспорту.

В даний момент можна виділити кілька типів суперконденсаторних батарей по області застосування для автомобілебудування:

- пускові - підключаються паралельно до стартерної акумуляторної батареї для поліпшення пускових якостей і тривалості життя батареї;
- для підтримки харчування могутніх автомобільних акустичних систем;
- буферні - для використання в гібридних автомобілях, відрізняються відносно низькою ємністю і великою вихідною потужністю;
- тягові - для застосування як основне джерело харчування електромобіля.

Зараз одними з кращих характеристик, серед представлених промислових зразків суперконденсаторів були заявлені російськими компаніями "ЭСМА" і "ИНКАР-М". Також виробляються суперконденсатори для нестатків автотранспорту в Німеччині компанією Epcos. Слід зазначити продукти фірм Maxwell Technologies, NessCap, Panasonic. Цікаві розробки

ведуться фірмою Evans Capacitor, де створений новий тип суперконденсаторів - гібридні суперконденсатори.

Переваги суперконденсаторів: найбільша щільність потужності з усіх різновидів акумуляторів - як об'ємна, так і вагова; довговічність - понад 10 років і 100,000 циклів заряду/розряду (уже підтверджена практичним використанням суперконденсаторів); дуже швидкий процес заряду батарей - до 100% ємності від 15 до 40 хвилин (залежить, в основному, від можливостей зарядного пристрою); необслуговування - суперконденсатори герметичні; відносно низький показник саморозряду - до 10% на місяць; дружність навколишньому середовищу - більшість суперконденсаторів побудовані на основі активованого вугілля, лугу, гідроксиду нікелю і нікелевих електродів, для суперконденсаторів на основі свинцевих електродів мається уже відпрацьована технологія переробки; можливість роботи при низьких температурах без істотного зниження характеристик; простота визначення рівня заряду суперконденсатора - однозначна залежність від рівня напруги на конденсаторі.

Недоліки суперконденсаторів: вага - кращі вироблені суперконденсатори мають щільність енергії на рівні 10...12 Вт·год/кг, масові – 5...6 Вт·год/кг [9]; велике спадання напруги при розряді; висока вартість, до 10 USD за кілоджоуль накопиченої енергії, але ця вартість, в основному, визначається дрібносерійним процесом виробництва суперконденсаторів, і при зрості попиту і появі дійсної конкуренції може бути зменшена в 7...10 разів.

## **1.6 Акумуляування енергії магнітного поля**

**1.6.1 Надпровідний електромагніт.** Котушки індуктивності (індуктори) акумулюють енергію в магнітному полі. Кількість акумульованої енергії

$$E_m = \frac{1}{2} LI^2, \quad (1.6)$$

де  $I$  -струм, який протікає у котушці.

З (1.6) очевидно: щоб збільшити запас енергії, струм, який протікає у котушці повинний бути настільки високий наскільки це можливо. Через високий опір ненадпровідників, струм котушки не може бути досить високим, щоб акумулювати істотні кількості енергії. Надпровідники мають три критичних параметри: щільність електричного струму  $J$  (А/мм<sup>2</sup>), щільність магнітного потоку  $B$  (Т), і температуру  $T$  (К). Якщо витримані межі обмежень критичних параметрів, надпровідник має нульовий опір до потоку постійного струму.

Практично, надпровідники звичайно зроблені з NbTi чи Nb<sub>3</sub>Sn мультінітей, вбудованих у мідну чи алюмінієву матрицю стабілізації, яка також використовується, щоб поглинути енергію у випадку, якщо надпровідник раптово стає звичайним провідником [7].

Переважніше в даний час використовувати - Nb<sub>3</sub>Sn, оскільки з ним легко працювати. Критичне значення для Nb<sub>47%</sub>Ti

$$\begin{aligned} J_c &= J|_{B=0, T=0} = 10^4; \\ B_c &= B|_{J=0, T=0} = 15; \\ T_c &= T|_{J=0, B=0} = 9.2. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Нормальний провідник при проектуванні трансформатора, наприклад, звичайно дорівнює  $J = 3$  А/мм<sup>2</sup>, у той час як (1.7) показує, що для Nb<sub>47%</sub>Ti - надпровідника ( $J$  повинний бути) у ~3300 разів вище [5]. Таким чином, помічено, що надзвичайно високі потоки можуть бути досягнуті системами SMES (надпровідниковий індуктивний накопичувач енергії). Якщо нормальний провідник використовується з тією же щільністю струму і відповідає Nb<sub>47%</sub>Ti провіднику, за аналогією, на підставі (1.6), впливає, що

обмотка надпровідника буде здатна зберігати (запасати) приблизно в 107 разів більше енергії. Унаслідок того, що використовується великий потік магнітної індукції, повітряне середовище використовується як ядро в цих системах. Обмотка може бути соленоїдною, яка дешевше, але має високе поле розсіювання, чи тороїдною, з нульовим зовнішнім магнітним полем, але більш дорога.

Провідники в системі SMES (надпровідникового індуктивного накопичувача енергії) піддані надзвичайно великим навантаженням. Тому використовується міцна і дорога механічна конструкція, щоб витримувати ці навантаження.

Дослідження високотемпературних надпровідників (HTS) з більш високим  $T_c$  ніж NbTi, показані в (1.7). Це дозволяє використовувати рідкий азот, замість рідкого гелію для криогенного холодоносія, що істотно зменшує вартість. Проблема в HTS полягає в тому, що матеріали є тендітною керамікою, що ускладнює виробництво реальних провідників.

Істотний прогрес, був досягнутий американською Корпорацією Надпровідника з упровадженням їх BSCCO гнучкого проводу на металевій основі. Це керамічний оксид міді, що містить вісмут, стронцій, кальцій, і невелику кількість тетраетилсвинця. Одна така котушка, зроблена з цього проводу успішно використовувалася в системі SMES як пристрій захисту від спадання напруги на паперовій фабриці.

Питома потужність SMES систем знаходиться в межах від 200 до 1500 Вт/кг [4] при використанні енергії подвійного шару ємності, поміщеної між алюмінієвими електролітичними конденсаторами і здвоєним конденсатором.

Це робить їх придатними для повної розрядки протягом 100 мс...60 с. Ці показники часу включають і навантаження і час перезарядження, тому що системи SMES цілком двунаправлені в їхній питомій потужності. Фактором, що обмежує питому потужність систем SMES, є опір по перемінному струму, у результаті відповідної обмотки, стосовно покриття і близостного ефекту.

Якщо має місце миттєвий витяг енергії,  $di/dt$  викликаний на котушку, у результаті цього опір підвищується в обмежених крапках через обидва вищезгадані ефекти. Це, у свою чергу викликає підвищення температури, що може викликати надпровідник з області надійної роботи, визначеної в (1.7).

Це перериває котушку і номінальне значення провідника стає на обмежених ділянках. Тоді має місце граничне значення потужності розсіювання на цих ділянках і потенційне руйнування котушки.

Системи SMES мають капітальні витрати приблизно \$700...\$1000/кг і доступні на найвищих енергетичних рівнях усіх технологій (до 1 ГВт). Після паливних елементів, вони найбільш дорогі з усіх розглянутих варіантів.

Системи SMES мають майже необмежену кількість циклів розрядки/зарядки і можуть бути цілком виражені без якого-небудь шкідливого впливу або скорочення високої ефективності (ККД>95%).

## 1.7 Акумулювання кінетичної енергії

**1.7.1 Махові колеса (маховики).** Акумулювання кінетичної енергії у формі примітивних маховиків вивчалось протягом сторіч, але, тільки починаючи з розвитку високоміцних композиційних матеріалів і з низькими втратами опорного тиску, цей метод став здійсненним технічним варіантом.

Кінетична енергія, збережена в маховій масі, дорівнює, Дж

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2, \quad (1.8)$$

де  $I$  - момент інерції;

$\omega$  - кутова швидкість.

Момент інерції визначений масою і геометрією махового колеса, обчислюється як,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$

$$I = \int x^2 dm_x, \quad (1.9)$$

де  $x$  - відстань від осі обертання до диференційної (відмітної) маси  $dm_x$ .

У спеціальному випадку маховика з порожнім вінцем ( $r_i/r_o \rightarrow 1$ , де  $r_i$  - внутрішня частина і  $r_o$  - зовнішній радіус), уся маса сконцентрована в нескінченно тонкому вінці (зовнішній оправі). Таким чином, з (1.9) момент інерції для порожнього вінця -  $I = mr^2$ , де  $m$  - маса і  $r$  - радіус маховика.

Запасена енергія в маховику з порожнім вінцем, дорівнює, Дж

$$E_k = \frac{1}{2} mr^2 \omega^2. \quad (1.10)$$

А питома енергія, (1.10) поділяється на масу, Дж/кг

$$e_{k,m} = \frac{1}{2} r^2 \omega^2. \quad (1.11)$$

Якщо рівняння (1.11) помножити на щільність маси  $\rho$  маховика, одержимо щільність енергії, Дж/м<sup>3</sup>

$$e_{k,v} = \frac{1}{2} \rho r^2 \omega^2. \quad (1.12)$$

Для маховика з порожнім вінцем, матеріал повинний витримувати тангенціальну напругу  $\sigma_{\min}$  при даній кутовій швидкості  $\omega$ . Ця напруга, представлена, Н/м<sup>2</sup>

$$\sigma_{\min} = \rho r^2 \omega^2. \quad (1.13)$$

З (1.12) і (1.13) максимальна досяжна щільність енергії з високоміцним матеріалом буде дорівнювати, Дж/м<sup>3</sup>

$$\hat{e}_{k,v} = \frac{1}{2} \sigma_{\min} . \quad (1.14)$$

З рівняння (1.14) випливає, щоб одержати високу щільність енергії, необхідний високоміцний матеріал. Це причина, чому системи збереження енергії махового колеса тільки недавно стали технічно реалізованим рішенням, тому що композиційні матеріали з високоміцного волокна - фактично останнє досягнення, з початку 1980-х років.

Якщо (1.14) розділити на  $\rho$ , одержимо вираження для максимальної досяжної питомої енергії, Дж/кг

$$\hat{e}_{k,m} = \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_{\min}}{\rho} \right) . \quad (1.15)$$

Виходячи з (1.15) можна відзначити, що питома енергія обернено пропорційна масовій щільності матеріалу махового колеса. Коефіцієнт 1/2 у (1.14) і (1.15) дійсний тільки для маховиків з порожнім вінцем.

Інші форми (конфігурації) маховика. Більш загальне вираження для максимальної щільності енергії, для усіх форм маховика, отримане з (1.14), Дж/м<sup>3</sup>

$$\hat{e}_{k,v} = K \sigma_{\min} , \quad (1.16)$$

і для максимальної питомої енергії, Дж/кг

$$\hat{e}_{k,m} = K \frac{\sigma_{\min}}{\rho} , \quad (1.17)$$

де  $K$  - конструктивні параметри або коефіцієнт форми, що залежить від геометрії маховика і виявляється в основному з моменту інерції  $I$ .

На рис. 1.10 зображені чотири маховики різної форми з відповідними конструктивними параметрами. Диск Лавала, названий на честь Карла де Лавала, шведського інженера, що його винайшов. Ця форма маховика має наступну особливість: радіальна і тангенціальна напружка однакова у всіх крапках маховика. Це - теоретична геометрія (габарити, структура, конфігурація) з  $r_0 \rightarrow \infty$ . Таким чином, на практиці, не можливо одержати  $K$ , точно рівні 1.

Більш технологічну конфігурацію має суцільний диск, показаний у другій секції рисунку 1.10, і  $K$  у цьому випадку менше  $2/3$ . Диск із частково-порожнім вінцем має невеликий коефіцієнт форми. Наприклад для виготовлення маховика з  $r_0/r_i = 1.1$ , що є положистим колесом, коефіцієнт форми повинен бути  $K = 0.305$ .

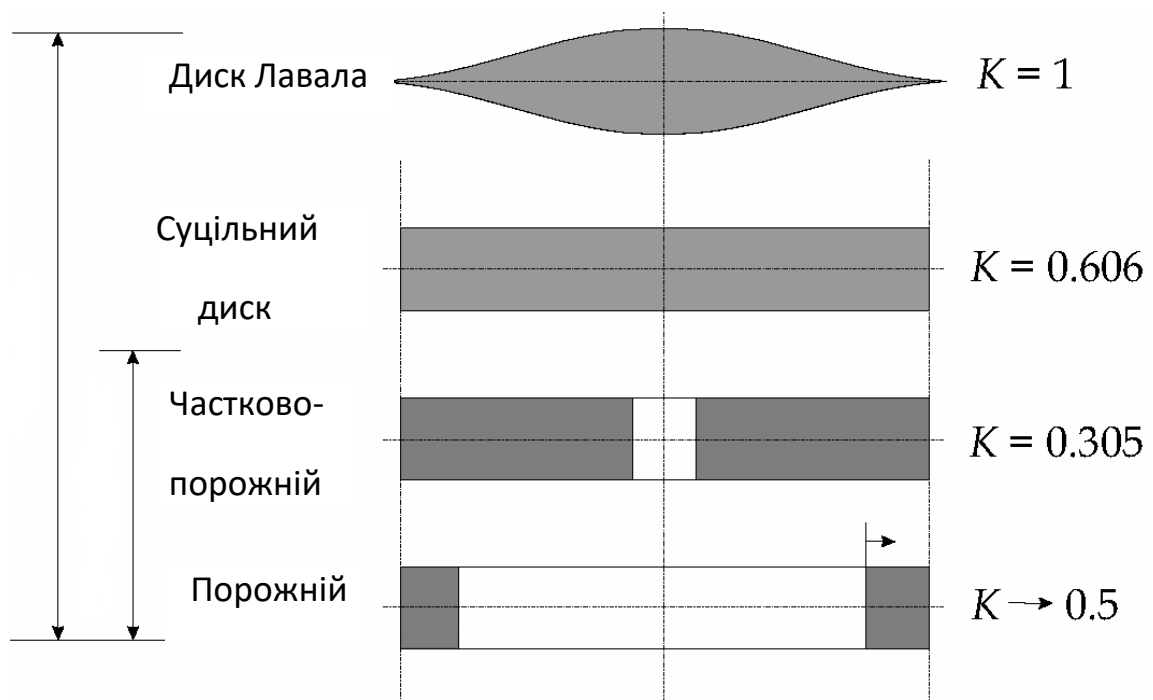


Рисунок 1.10 – Чотири різних форми маховика

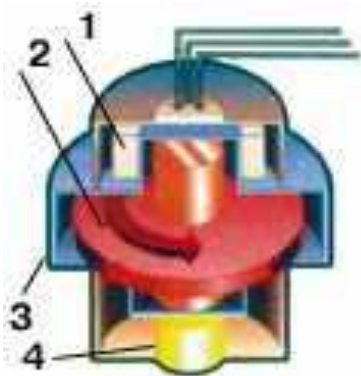
Перші дві конфігурації маховика, показані на рис. 1.10 [2], підходять тільки для ізотропних матеріалів, тому що вони можуть протистояти високій напруженості й у тангенціальних і в радіальних напрямках.

Останні дві конфігурації, показані на рисунку 1.10, є придатними як для ізотропних, так і для анізотропних матеріалів.

Анізотропні матеріали - матеріали з різними силами в різних напрямках, подібні композиційним матеріалам скляного й вуглецевого волокна.

У (1.16) замічено, що при оптимізації щільності енергії маховика, необхідно використовувати високоміцний матеріал. При високій питомій енергії, (1.17), матеріал повинний мати низьку питому щільність.

Сучасні маховики, які являють собою ротори з композитних матеріалів, які обертаються зі швидкістю до 36000 об/хв в корпусі, що вакуумувався, на магнітних підвісах, можуть запасати енергію, якої вистачить для 400...600 км пробігу. І при цьому термін служби - десятки років і маса 60...200 кг.



1 – статор; 2 – ротор; 3 – корпус, що вакуумувався; 4 – магнітний підвіс

Рисунок 1.11 – Маховичний накопичувач енергії

На рисунку 1.11 зображено маховичний накопичувач енергії – мотор-генератор з ротором, виготовленим з композитного матеріалу. При віддачі енергії ротор гальмує, при зарядці – розганяється.

## **Висновки до розділу 1**

1. Застосування гібридних транспортних засобів значною мірою може вирішити питання зменшення негативного екологічного впливу на навколишнє середовище;
2. Аналіз засобів накопичення енергії в силових агрегатах гібридних транспортних засобів показав актуальність подальшого використання засобів хімічного накопичення електроенергії;
3. Розглянуто засоби механічного накопичення електроенергії;
4. Визначено перелік засобів накопичення енергії відносно якого буде проведено порівняльний техніко-економічний аналіз.

## **РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ**

### **2.1 Свинцево-кислотні акумуляторні батареї - сукупна вартість експлуатації**

Питання вартості АКБ для гібридних автомобілів стоять дуже гостро. Акумулятор є основною видатковою частиною, тому питання мінімалізації витрат на зміну АКБ повинні стояти на одному з перших місць при розрахунку гібридного автомобіля. В даний час найбільш розповсюдженим вибором для конвертації автомобіля з ДВЗ в гібридний автомобіль є, перевірена часом, герметизована свинцево-кислотна акумуляторна батарея.

Ознайомимося з деякими зауваженнями, що стосуються вибору герметизованих свинцево-кислотних акумуляторних батарей з погляду мінімалізації витрат на покупку й експлуатацію. Аналіз дається на основі заяв виробників акумуляторів. Для аналізу будуть узяті параметри герметизованих акумуляторних батарей deep cycle від Hawker (G70EP) і Optima (Yellow Top) [8].

Для початку необхідно уточнити методику порівняння. За одиницю виміру візьмемо вартість одиниці ємності ( $\text{USD}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ ) акумуляторної батареї, а також розрахуємо вартість накопичування електроенергії за один цикл заряду/розряду в зв'язку з рівнем розряду акумулятора. Дані по розглянутим АКБ зведені у таблиці 2.1.

Чим менше глибина розряду, тим менше вартість використання батареї, за рахунок нелінійного збільшення кількості циклів заряду/розряду при частковому розряді батареї. Також є різниця в ціні одного циклу в залежності від типу батареї і глибини розряду. Розглянуті батареї мають приблизно однакову вартість використання при 70...80% розряду, але при менш глибоких циклах більш дорога батарея виривається вперед.

Таблиця 2.1 – Порівняння якостей герметизованих АКБ

| % розряду                          | Кількість циклів Optima YT | Кількість циклів Hawker G70EP | Вартість накопичування 1кВт·год електроенергії за один цикл Optima YT | Вартість накопичування 1кВт·год електроенергії за один цикл Hawker G70EP |
|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 10                                 | 4600                       | 1750                          | 0,08891                                                               | 0,14657                                                                  |
| 20                                 | 4250                       | 1500                          | 0,09212                                                               | 0,16267                                                                  |
| 30                                 | 4000                       | 1250                          | 0,09475                                                               | 0,18520                                                                  |
| 40                                 | 3400                       | 800                           | 0,10265                                                               | 0,26125                                                                  |
| 50                                 | 2100                       | 700                           | 0,13524                                                               | 0,29143                                                                  |
| 60                                 | 1200                       | 600                           | 0,19917                                                               | 0,33167                                                                  |
| 70                                 | 600                        | 500                           | 0,34833                                                               | 0,38800                                                                  |
| 80                                 | 400                        | 400                           | 0,49750                                                               | 0,47250                                                                  |
| 90                                 | 250                        | 350                           | 0,76600                                                               | 0,53286                                                                  |
| 100                                | 200                        | 300                           | 0,94500                                                               | 0,61333                                                                  |
|                                    |                            |                               |                                                                       |                                                                          |
| Вартість 1 кВт·год батареї, USD    | 179                        | 169                           |                                                                       |                                                                          |
| Ціна 1 кВт·год електроенергії, USD | 0,05                       | 0,05                          |                                                                       |                                                                          |

Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновки про вибір типу і ємності батареї для гібридного автомобіля. Якщо ємність батареї розраховується виходячи з максимального щоденного пробігу (потрібно вважати 70...80% циклів заряду/розряду через поступову деградацію характеристик батареї під час циклічності), то різниці в ціні експлуатації, обраних для порівняння АКБ, практично непомітно. Якщо ж є можливість розташувати на гібридному автомобілі велику ємність батареї, то вигідніше розраховувати ємність батареї, виходячи з 30...40% циклів.

На підставі даної таблиці побудовані наступні графіки

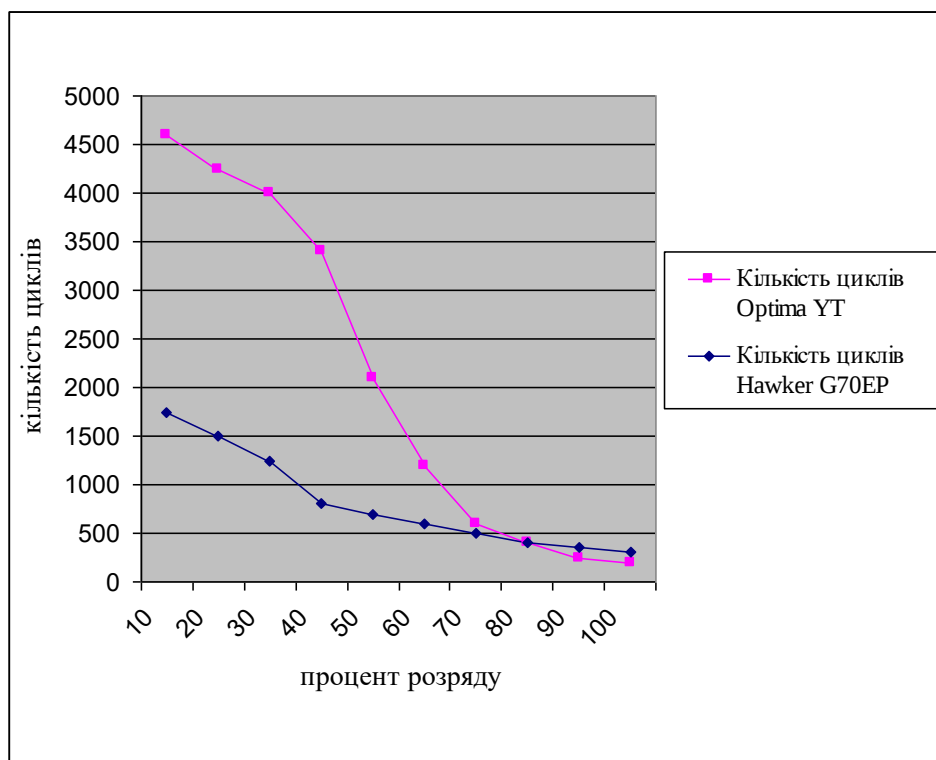


Рисунок 2.1 – Залежність кількості циклів заряд/розряд для різних моделей свинцево-кислотних акумуляторних батарей

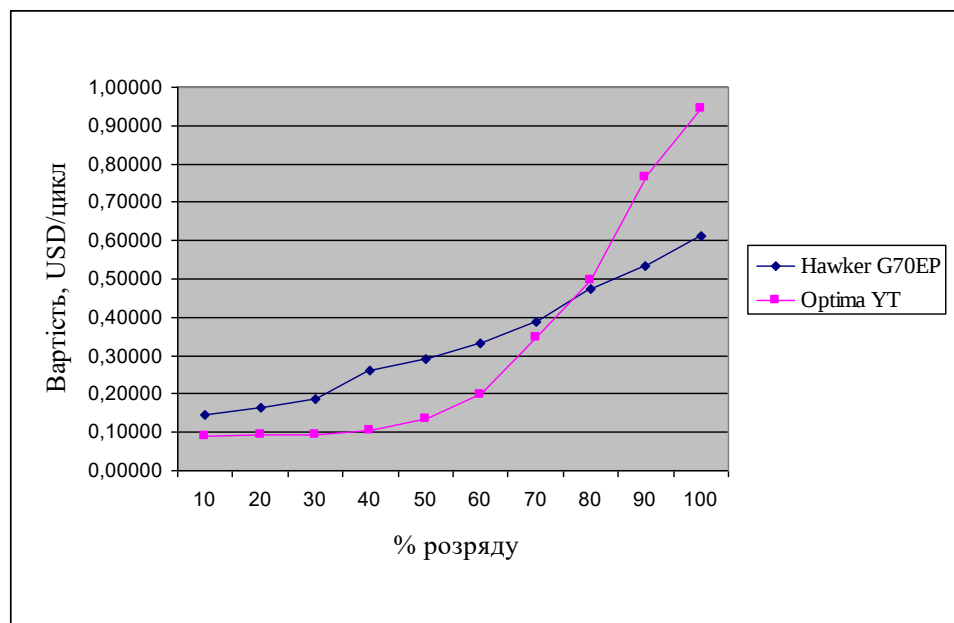


Рисунок 2.2 – Залежність вартості одного циклу заряд/розряд від глибини розряду

## 2.2 Продовження ресурсу літій-іонної акумуляторної батареї

Суб'єктивний погляд на проблему продовження ресурсу Li-ion акумуляторів. Практично всі дані узяті з перевірених джерел (batteryuniversity.com - літій-іонні (lithium-ion) батареї, із сайтів виробників Li-ion батарей - Valence, ThunderSky, Everspring), однак під час компіляції інформації деякі занадто оптимістичні заяви виробників батарей довелося трохи виправити.



Рисунок 2.3 - Літій - іонна акумуляторна батарея

Літій - іонні акумулятори більше страждають від процесу “старіння” (погіршення характеристик протягом часу), ніж від циклічності. Це означає, що більшість акумуляторів не може служити понад 5 років при звичайних умовах експлуатації. При покупці літій - іонних акумуляторів, варто уважно поставитися до дати виготовлення - при піврічній давнині можна втратити приблизно 10% від заявленого ресурсу.

Старіння батарей прискорюється при роботі або при збереженні в жарких умовах.

Таблиця 2.2 - Деградація характеристик літій-кобальтових акумуляторів в зв'язку з температурою зберігання

| Температура, °C | 40% рівень заряду<br>(рекомендований рівень заряду) | 100% рівень заряду<br>(підтримується користувачем при роботі) |
|-----------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 0°C             | 98% через 1 рік                                     | 94% через 1 рік                                               |
| 25°C            | 96% через 1 рік                                     | 80% через 1 рік                                               |
| 40°C            | 85% через 1 рік                                     | 65% через 1 рік                                               |
| 60°C            | 75% через 1 рік                                     | 60% через 3 місяця                                            |

З огляду на те, що стандартом визначення моменту завершення життя акумулятора виробником є зниження його ємності до 80% від номінальної зрозуміло, звідки з'явилися 5 років життя (коли акумулятор працює при температурі не вище 25°C і більшість часу знаходиться в напіврозрядженому стані). Тому варто правильно організовувати охолодження батарей при експлуатації і заряджати акумулятор безпосередньо перед використанням, домагаючись середнього рівня заряду в процесі експлуатації близького до 40%.

Варто враховувати температурний фактор і при експлуатації Li-ion акумуляторів - розряд може здійснюватися і при низьких температурах (у залежності від хімії акумулятора від -25°C до -10°C), але заряд повинний вироблятися тільки при позитивній температурі батареї.

Кількість циклів заряду/розряду не так сильно впливають на ресурс літій-іонної батареї, як вік і температурний фактор - при короткому часі циклічності (безупинні цикли заряду/розряду струмом 0.5 C ) і гарному охолодженні літій-іонна батарея може витримати від 1000 циклів (для літій-кобальтових) до 2000...3000 циклів (для літій-марганцевих).

Перевищення кінцевої напруги після заряду з 4.2 В до 4.35 В підвищує ємність акумулятора на 10...15% при зниженні терміну експлуатації в 4...6 разів [11].

BMS (Battery Manegement System) - система керування батареєю - електронний прилад, що обов'язково ставиться на кожен акумуляторну банку в батареї для контролю процесу заряду/розряду батареї, BMS також мають

логіку для визначення температури, кількості зарядів/розрядів, оцінку імовірності виходу з ладу акумулятора. В основному, задача BMS полягає в контролі напруги на акумуляторі і шунтуванні струмів при досягненні граничних меж, також може контролюватися температура елемента. Для уникнення виходу з ладу літій - іонного акумулятора при повній його розрядці необхідно негайно зарядити його, інакше BMS не дозволить початися заряду коли напруга на елементі упаде нижче визначеного порога через саморозряд батареї по розуміннях безпеки.

Літій-іонні батареї погано переносять низькі струми заряду і високі струми розряду (зауваження про високі струми розряду не відноситься до  $\text{LiFePO}_4$  акумуляторів, які можуть переносити великі струми розряду, і, у меншому ступені для  $\text{LiMnO}_2$  і  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ). Для досягнення максимальної тривалості життя необхідно використовувати струми 0.5 C (половина номінальної ємності) для заряду і розряду акумулятора. Для  $\text{LiCoO}_2$  акумуляторів небажано переходити межу в 1 C для струмів заряду і розряду (розряд при 2 C приводить до скорочення життя в 2 рази, при 3 C - у 4 рази).

На закінчення можна сказати, що дотримання всіх зазначених обережностей дозволить досягти великого терміну життя (ресурсу) літій-іонного акумулятора, і він буде задовольняти своєю ємністю і низьким рівнем внутрішнього опору. Також кожні 6...12 місяців з'являються літій-іонні акумулятори на основі інших хімічних сполук і внутрішньої конструкції - у них будуть трохи інші характеристики. До заяв виробників із приводу нових акумуляторів потрібно відноситися з відомою часткою скептицизму, оскільки тільки досвід тривалої експлуатації може дати відповідь на питання відповідності заявлених параметрів реальним і перевірити рішення з приводу правильної експлуатації Li-ion акумуляторів.

## **2.3 Натрій нікель-хлоридні акумуляторні батареї (ZEBRA), особливості внутрішньої будівлі і функціонування**

Основним розроблювачем натрій нікель-хлоридних акумуляторів є Beta Research & Development Ltd. у Великобританії.

Почнемо з внутрішнього акумуляторного елемента натрій нікель-хлоридної батареї. Зовні елемент являє собою сталевий прямокутний паралелепіпед, у нього засипається металевий натрій (матеріал негативного електрода), уставляється керамічна трубка з бета-глинозему, що є одночасно й ізолятором між позитивним і негативним електродами, і твердим електролітом, який є проникним для іонів натрію. У керамічний сепаратор засипається матеріал позитивного електрода: хлорид нікелю (II) і хлорид заліза (II), порошок алюмохлорида натрію і вставляється контактна пластина, вивід якої розташовується на торці акумуляторного елемента.

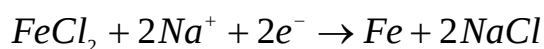
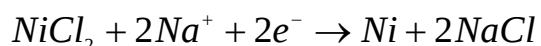
Оскільки всі матеріали електродів є твердими речовинами при нормальних умовах, то для роботи акумулятор варто тримати в розігрітому до 300°C стані.

Внаслідок того, що керамічний сепаратор є твердим електролітом у системі натрій нікель-хлоридного акумулятора, то він лімітує швидкість переносу іонів натрію між електродами (у твердій речовині швидкість пересування набагато менше, ніж у розплаві). Перші сепаратори з бета-глинозему були круглої в перетині форми, що не дозволяло одержати велику потужність від акумулятора. У сучасних батареях ZEBRA використовуються сепаратори у виді чотирилисника на розрізі, що дозволило відбирати на 50% більше потужності за рахунок збільшення площі поверхні і зменшення відстані, необхідної для подолання іонами натрію усередині електродів.

Стійкість керамічного сепаратора визначає тривалість життя акумулятора. Згодом сепаратор руйнується, що веде до реакції між хлоридом нікелю і натрієм, з утворенням повареної солі і нікелю. Дана суміш досить добре електропровідна, так що при відмовленні десятка-другого з декількох

сотень акумуляторів не відбувається серйозного зниження характеристик батареї. На даний момент, при постійній підтримці робочої температури, акумуляторна батарея ZEBRA витримує більш 7 років експлуатації і більш 1000 повних циклів заряду/розряду. Через керамічний сепаратор акумулятор може витримати 50 циклів нагрівання/охолодження.

Тепер розберемо пристрій позитивного електрода. Сучасні акумулятори ZEBRA є не чисто натрій нікель-хлоридними, а натрій нікель-залізо-хлоридними. Уведення хлориду заліза до складу позитивного електрода сприяє більш низькому внутрішньому опору акумулятора. Також при розряді чисто натрій нікель-хлоридної системи наприкінці розряду різко падає вихідна потужність (майже в 2 рази). При додаванні хлориду заліза вдається уникнути даного ефекту. Розглянемо рівняння електрохімічних реакцій на позитивному електроді обох систем



Легко можна помітити, що реакції ідентичні. Однак є мала істотна відмінність: напруга, яка видається першою реакцією 2.58 В, а друга – 2.35 В. Таким чином, при введенні заліза наприкінці розряду вдається підтримати потужність, видавану акумулятором на прийнятному рівні. Це важливо, оскільки для акумуляторів ZEBRA характерна відносно низька щільність потужності.

Утилізація акумуляторів ZEBRA дуже проста - їх можна відправляти на переплавляння без якого-небудь розмонування. У результаті переплавляння утвориться залізо-нікелевий сплав, що може використовувати сталеливарна промисловість. Навіть при простому викиданні батарея ZEBRA мало небезпечна для навколишнього середовища (основні компоненти і сталевий корпус для навколишнього середовища або малотоксичні, або взагалі нетоксичні).

Окремий акумуляторний елемент не представляє великого практичного інтересу - робота при високій температурі, низький параметр вихідної потужності і відносно невелика ємність не дозволяють всерйоз говорити про його використання для якого-небудь застосування, крім наукового. І, у той же час, ситуація докорінно міняється, якщо зібрати кілька сотень акумуляторів ZEBRA у батарею.

Типовий представник акумуляторної батареї ZEBRA - ZEBRA Z5C. Зовнішній корпус батареї являє собою сталевий двохстінний корпус, між стінками якого створений вакуум. Такий термос дозволяє уникнути великого розсіювання тепла батареєю (у нормальних умовах розсіюється близько 100 Вт тепла), що важливо не тільки для функціонування акумуляторів ZEBRA, але і для забезпечення безпеки використання. У середині корпуса знаходяться 216 акумуляторних елементів ML3. Завдяки великій кількості елементів забезпечується ємність у 16 кВт·год (при двогодинному розряді), напруга в 278 В чи 557 В і максимальна видавана потужність 32 кВт [12].

Для підтримки сталості внутрішньої температури усередині корпуса батареї ZEBRA мається нагрівач і система повітряного охолодження. Для розігріву акумуляторів до робочої температури нагрівачу потрібно біля доби. Потім нагрівач підтримує температуру на робочому рівні (вище 270°C) за рахунок енергії батареї. При розряді виділяється близько 10% від виданої енергії, що вимагає охолодження акумуляторів до температури нижче максимальної робочої (350°C).

Для підтримки правильної роботи акумуляторної батареї ZEBRA убудована розумна система керування. Система підтримує внутрішній стан батареї на оптимальному рівні, автоматично відключає харчування при відсутності навантаження й у критичних ситуаціях (мається убудований датчик несправності). Уся система може керуватися через послідовний порт комп'ютера з Windows. Доступна не тільки функція моніторингу стану батареї в реальному часі, але і можливість тюнінга параметрів акумуляторної батареї під конкретну область застосування.

Отже, натрій нікель-хлоридні акумулятори ZEBRA є дуже перспективними джерелами струму для електротранспорту. Для електромобілів виробництво дешевих вторинних джерел струму життєво необхідно (через необхідний великий запас енергії на борті). Ріст цін на свинець і літій в зв'язку зі зростаючим споживанням цих металів для акумуляторної промисловості вимагає появи дешевої конкурентної технології, такої як реально працюючі конкуренти розповсюджених хімічних джерел струму для електромобілів - акумулятори ZEBRA.

#### ***2.4 Нікель-металгідридні акумуляторні батареї - особливості конструкції і функціонування***

Сучасні нікель-металгідридні акумулятори мають внутрішню конструкцію, схожу з конструкцією нікель-кадмієвих акумуляторів. Позитивний окисно-нікелевий електрод, лужний електроліт і розрахунковий тиск водню збігаються в обох акумуляторних системах. Різні тільки негативні електроди: у нікель-кадмієвих акумуляторів - кадмієвий електрод, у нікель-металгідридних - електрод на базі сплаву поглинаючих водень металів.

У сучасних нікель-металгідридних акумуляторах (рис. 2.4) [13] використовується склад воднеадсорбуючого сплаву виду  $AB_2$  і  $AB_5$ . Інші сплави виду  $AB$  чи  $A_2B$  не одержали широкого поширення. Символ  $A$  позначає метал (чи суміш металів), при утворенні гідридів яких виділяється тепло. Відповідно, символ  $B$  позначає метал, що реагує з воднем ендотермічно.

Для негативних електродів типу  $AB_5$  використовується суміш рідкоземельних елементів групи лантану (компонент  $A$ ) і нікель з домішками інших металів (кобальт, алюміній, марганець) - компонентів  $B$ . Для електродів типу  $AB_2$  використовуються титан і нікель з домішками цирконію, ванадію, заліза, марганцю, хрому.

Нікель-металгідридні акумулятори з електродами типу  $AB_5$  мають більше поширення через кращі показники циклічності, незважаючи на те, що акумулятори з електродами типу  $AB_2$  більш дешеві, мають велику ємність і кращі потужностні показники.



Рисунок 2.4 - Сучасний нікель-металгідридний акумулятор, виробництва французької компанії Saft

У процесі циклічності відбувається коливання обсягу негативного електрода до 15...25% від вихідного за рахунок поглинання/виділення водню. У результаті коливань обсягу виникає велика кількість мікротріщин у матеріалі електрода. Це явище пояснює, чому для нового нікель-металгідридного акумулятора необхідно зробити кілька циклів “тренувальних” циклів заряду/розряду для приведення значень потужності і ємності акумулятора до номінального. Також в утворенні мікротріщин є і негативна сторона - збільшується площа поверхні електрода, яка піддається корозії з витратою електроліту, що приводить до поступового збільшення внутрішнього опору елемента і зниженню ємності. Для зменшення швидкості корозійних процесів рекомендується зберігати нікель-металгідридні акумулятори в зарядженому стані.

Негативний електрод має надлишкову ємність стосовно позитивного як по перезаряду, так і по перерозряду для забезпечення прийняттого рівня виділення водню. Через корозію сплаву поступово зменшується ємність по перезаряду негативного електрода. Як тільки надлишкова ємність по перезаряду вичерпається, на негативному електроді наприкінці заряду почне виділятися велика кількість водню, що приведе до підбурення надлишкової кількості водню через клапани елемента, “википання” електроліту і виходу акумулятора з ладу. Тому для заряду нікель-металгідридних акумуляторів необхідний спеціальний зарядний пристрій, що враховує специфіку поведінки акумулятора для уникнення небезпеки саморуйнування акумуляторного елемента. При зборі батареї акумуляторів необхідно передбачити гарну вентиляцію елементів і не курити поруч із нікель-металгідридною батареєю великої ємності, яка заряджається.

Згодом, у результаті циклічності зростає і саморозряд акумулятора за рахунок появи великих пір у матеріалі сепаратора й утворенні електричного з'єднання між пластинами електродів. Ця проблема може бути тимчасово вирішена шляхом декількох циклів глибокого розряду акумулятора з наступним повним зарядом.

При заряді нікель-металгідридних акумуляторів виділяється досить велика кількість тепла, особливо наприкінці заряду, що є одним з ознак необхідності завершення заряду. При збиранні декількох акумуляторних елементів у батарею необхідна система контролю параметрів батареї (BMS), а також наявність терморозмикаючихся струмопровідних сполучних перемичок, між частиною акумуляторних елементів. Також бажано з'єднувати акумулятори в батареї шляхом точкового зварювання перемичок, а не пайки.

## **2.5 Електрохімічні процеси, що протікають усередині акумуляторів**

Електрохімічні процеси, що протікають усередині акумуляторів мають специфічні властивості, що обумовлені типами цих батарей. Ці процеси зображені у вигляді хімічних формул та приведені у таблиці [8].

Таблиця 2.3 - Електрохімічні процеси, що протікають усередині різних типів акумуляторних батарей

| Тип акумулятора                                                                                                                                                                                                          | Реакція на позитивному електроді                                                                                                                          | Реакція на негативному електроді                                                                        | Сумарна реакція                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Свинцево-кислотні акумулятори. Електроди - свинець і оксид свинцю (IV), електроліт - водяний розчин сірчаної кислоти.                                                                                                    | $[\text{PbO}_2] + 4\{\text{H}^+\}_{\text{aq}} + \{\text{SO}_4^{2-}\}_{\text{aq}} + 2\text{e}^- \leftrightarrow [\text{PbSO}_4] + 2\{\text{H}_2\text{O}\}$ | $[\text{Pb}] + \{\text{SO}_4^{2-}\}_{\text{aq}} \leftrightarrow [\text{PbSO}_4] + 2\text{e}^-$          | $[\text{Pb}] + [\text{PbO}_2] + 4\{\text{H}^+\}_{\text{aq}} + 2\{\text{SO}_4^{2-}\}_{\text{aq}} \leftrightarrow 2[\text{PbSO}_4] + 2\{\text{H}_2\text{O}\}$ |
| Нікель-кадмієві акумулятори. Електроди - кадмій і $\text{NiO}(\text{OH})$ , електроліт - водяний розчин $\text{KOH}$ .                                                                                                   | $[\text{NiO}(\text{OH})] + \{\text{H}_2\text{O}\} + \text{e}^- \leftrightarrow [\text{Ni}(\text{OH})_2] + \{\text{OH}^-\}_{\text{aq}}$                    | $[\text{Cd}] + 2\{\text{OH}^-\}_{\text{aq}} \leftrightarrow [\text{Cd}(\text{OH})_2] + 2\text{e}^-$     | $[\text{Cd}] + 2[\text{NiO}(\text{OH})] + 2\{\text{H}_2\text{O}\} \leftrightarrow [\text{Cd}(\text{OH})_2] + 2[\text{Ni}(\text{OH})_2]$                     |
| Нікель-металгідридні акумулятори. Електроди - $\text{NiO}(\text{OH})$ і гідрид металу, електроліт - водяний розчин лугу.                                                                                                 | $[\text{NiO}(\text{OH})] + \{\text{H}_2\text{O}\} + \text{e}^- \leftrightarrow [\text{Ni}(\text{OH})_2] + \{\text{OH}^-\}_{\text{aq}}$                    | $\text{MeH}_x + \{\text{OH}^-\} \leftrightarrow \text{MeH}_{x-1} + \{\text{H}_2\text{O}\} + \text{e}^-$ | $[\text{NiO}(\text{OH})] + \text{MeH}_x \leftrightarrow [\text{Ni}(\text{OH})_2] + \text{MeH}_{x-1}$                                                        |
| Цинк-срібні акумулятори. Катод - оксид срібла $\text{Ag}_2\text{O}$ , анод - цинковий, електроліт - водяний розчин лугу.                                                                                                 | $\text{Ag}_2\text{O} + \{\text{H}_2\text{O}\} + 2\text{e}^- \leftrightarrow 2[\text{Ag}] + 2\{\text{OH}^-\}_{\text{aq}}$                                  | $[\text{Zn}] + 2\{\text{OH}^-\}_{\text{aq}} \leftrightarrow [\text{Zn}(\text{OH})_2] + 2\text{e}^-$     | $\text{Ag}_2\text{O} + [\text{Zn}] + \{\text{H}_2\text{O}\} \leftrightarrow 2[\text{Ag}] + [\text{Zn}(\text{OH})_2]$                                        |
| ZEBRA, натрій - нікель хлоридні акумулятори. Катод - металевий натрій, анод - хлорид нікелю, електроліт - керамічний твердий + розплавлений алюмохлорид натрію ( $\text{NaAlCl}_4$ )                                     | $\text{NiCl}_2 + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Ni} + 2\text{Cl}^-$                                                                                    | $\text{Na} \leftrightarrow \text{Na}^+ + \text{e}^-$                                                    | $2\text{Na} + \text{NiCl}_2 \leftrightarrow 2\text{NaCl} + \text{Ni}$                                                                                       |
| Літій-іонні акумулятори. Електроди - літієва сіль амфотерного металу ( $\text{Co}$ , $\text{Mn}$ , $\text{Fe}$ , $\text{Cr}$ , $\text{V}$ , $\text{Ni}$ ) і вуглець (у виді коксу або графіту), електроліт - органічний. | зразкова (приблизна) сумарна реакція<br>$\text{LiMeO}_2 + 6\text{C} \leftrightarrow \text{MeO}_2 + \text{LiC}_6$                                          |                                                                                                         |                                                                                                                                                             |

## 2.6 Розрахунок реальної ємності акумулятора в залежності від навантаження

Для вказівки номінальної ємності виробники використовують розрахунок видаваного акумулятором струму в плинні стандартного часу

(якщо не зазначене значення цього часу в специфікаціях, то воно звичайно дорівнює 20 годинам для великих акумуляторів). Тобто, якщо в маркіруванні акумулятора зазначено, що його ємність дорівнює 100 А·год, тоді це означає, що він може жити навантаження струмом 5 А на протязі 20 годин.

Мається одна закономірність: чим більше навантаження на акумулятор, тим менше відсоток ємності, що віддається (акумулятор 100 А·год може видавати струм 100 А не на протязі 1 години, а протягом набагато меншого часу – наприклад 30 хвилин).

Причина цього явища зв'язана з тим, що усередині акумулятора струм тече завдяки іонній провідності. Якщо іонна провідність електроліту досить висока і не несе особливого значення, то процес переносу іонів усередині пластин акумулятора і подолання ними фазового розділу поверхня електрода/електроліту відбувається досить повільно. Тобто при швидкому розряді якась частина іонів не устигає вийти з електрода в електроліт (чи ввійти з електроліту в електрод) за час розряду, що обмежує видавану акумулятором ємність.

Математична модель цього процесу була описана в 1897 році Пекертом (Peukert). Він емпірично установив, що відношення між розрядним струмом  $I$  і часом розряду акумулятора  $T$  (від цілком зарядженого до цілком розрядженого) являє собою константне відношення, і може бути описано формулою

$$C_p = I^n \cdot T,$$

де  $C_p$  - ємність Пекерта (константне відношення для даного акумулятора);

$n$  - експонента Пекерта.

Експонента Пекерта завжди більше одиниці, чим більше  $n$ , тим менше здатність акумулятора віддавати повну ємність при підвищеному навантаженні. Найменше значення експоненти Пекерта мають літій-залізні, літій-марганцеві, літій-полімерні і свинцево-кислотні акумулятори з

електродами рулонного типу. Одне з найбільших значень  $n$  у недорогих тягових свинцево-кислотних батареях.

Експонента Пекерта звичайно розраховується на підставі виміру часу повного розряду ( $T_1$  і  $T_2$ ) для двох різних струмів ( $I_1$  і  $I_2$ ). Для приблизних розрахунків можна використовувати таблиці або графіки розрядки, надані виробником акумулятора. Тому що  $C_p$  - константа, ми можемо записати таке рівняння

$$C_p = I_1^n \cdot T_1 = I_2^n \cdot T_2,$$

перетворюючи вираз, одержуємо формулу розрахунку експоненти Пекерта

$$n = \log(T_2 / T_1) / \log(I_1 / I_2),$$

Ґрунтуючись на знанні значень експоненти Пекерта і ємності Пекерта [14] можна розраховувати час роботи акумулятора при визначеному навантаженні

$$T = C_p / I^n.$$

Існуючі просунуті монітори стану батарей (у складі системи керування батареєю, BMS) у своїх розрахунках, швидше за все, використовують дані рівняння. Однак, звичайно споживаний струм міняється в часі, бувають тривалі перерви в роботі акумулятора, а також константні значення ємності й експоненти Пекерта міняються в процесі роботи акумулятора (і їх приходить час від часу перераховувати для одержання реальних показань монітора). Це особливо яскраво видно на прикладі “цифрового ефекту пам'яті” у літій-іонних батареях для ноутбуків - при експлуатації в умовах часткового заряду/розряду відзначається поступове зменшення часу роботи від акумуляторної батареї, через невідповідність ємності, що залишилася, розрахованою системою керування батареєю, реальної. Ефект “цифрової

пам'яті” нівелюється повним зарядом з наступним повним розрядом акумулятора раз у 30...50 циклів.

Описана вище система моніторингу досить складна, і багато виробників BMS, можливо, задовольняються виміром швидкості падіння вольтажу на акумуляторі в процесі розряду. Для систем із приблизно постійним в часі навантаженням ці BMS повинні давати досить точні результати, і, у той же час, можуть підсилювати ефект “цифрової пам'яті” при нерівномірному споживанні струму.

Ємність, що не була віддана акумулятором, залишається в акумуляторі. Тобто, якщо батарея 100 А·год цілком розрядилася під навантаженням 50 А за годину, тоді і при заряді вона споживе близько 50 А·год. Якщо батарея 100 А·год, цілком розряджена струмом 50 А за годину, постоїть кілька годин, то поступово відновиться втрачена ємність (за рахунок дифузії іонів в електродах акумулятора), і з неї можна буде витягти ще небагато ампер-годин.

Цей ефект звичайно використовують власники електромобілів з недорогими тяговими свинцево-кислотними акумуляторами - коли акумулятор сильно розряджений, а треба проїхати ще пристойну відстань, електромобіль зупиняють на узбіччі і чекають якусь кількість часу, поки не відновиться ємність батареї (досить тривалий час). Після змушеної зупинки, можна рухатися далі до наступної змушеної стоянки, поки не вичерпається реальна ємність батареї. Ця ж причина стоїть на чолі того факту, що гольф-кари, з їх низькою швидкістю, можуть проїхати набагато більше відстані, ніж електромобіль з акумулятором подібної ємності, але який пересувається з більшою швидкістю (при їзді в реальних умовах також сильно впливає зростання опору повітря руху при великих швидкостях). Знання закономірності залежності ємності акумулятора від струму розряду дозволяє планувати необхідну ємність і тип акумуляторів на борту електромобіля або гібридного автомобіля (чи іншого автономного могутнього споживача електрики).

## 2.7 Розрахунок максимальної потужності, видаваної акумулятором

На підставі закону Ома для повного ланцюга (сила струму в повному ланцюзі дорівнює відношенню ЕРС ланцюга до її повного опору)

$$I = E / (R + r).$$

Відповідно до цієї формули, чим більше значення внутрішнього опору  $r$ , тим менший струм може віддавати акумулятор. Так як ЕРС ( $E$ ) можна прийняти як номінальну напругу ( $U_{ном}$ ) на акумуляторі при розімкнутому ланцюзі, то закон Ома для повного ланцюга матиме наступний вигляд

$$U_{ном} = IR + Ir,$$

відомо, що акумулятор може працювати тільки у визначеному діапазоні напруг. При навантаженні, через внутрішній опір, напруга на акумуляторі не повинна упасти, нижче  $U_{min}$ . Знаючи закон Ома для ділянки ланцюга ( $U=IR$ ), можна відобразити в формулі в такий спосіб

$$U_{ном} = U_{min} + Ir,$$

використовуючи отриманий результат, уже впевнено можна одержати значення максимального струму, що може видати акумулятор

$$I = (U_{ном} - U_{min})/r.$$

Знаючи, що потужність, споживана ділянкою ланцюга дорівнює добутку сили струму та напруги, подаваної на цю ділянку [14], можна довідатися максимальну потужність, видавану акумулятором

$$P = U_{min} \cdot (U_{ном} - U_{min})/r.$$

Таким чином, отримано значення максимальної потужності, видаваної одним акумулятором. Для розрахунку максимальної потужності батареї необхідно помножити отримане значення для одного акумулятора на кількість акумуляторів у батареї.

Приведений оцінний розрахунок потужності, видаваної при розряді - на початку розряду акумулятор може видати більше потужності, ніж наприкінці. Другий нюанс - ті втрати потужності, що відбуваються усередині акумулятора через наявність внутрішнього опору. Під час навантаження йде розігрів акумулятора пропорційно квадрату сили струму і часу роботи ( $Q=I^2 \cdot r \cdot \Delta t$ ). Так як акумулятор має визначений робочий температурний режим, потрібно враховувати розігрів акумулятора при проектуванні акумуляторної батареї, і, при необхідності, забезпечити правильну систему охолодження.

## 2.8 Проблеми складання батарей акумуляторних елементів

Поломка одного акумулятора (що не так вже і дорого) може привести до більш швидкої деградації властивостей усієї батареї (що вже буде коштувати значно дорожче).

Батарея акумуляторів збирається для того, щоб одержати необхідну напругу для споживача, набрати необхідну ємність і забезпечити достатні потужнісні характеристики вторинного хімічного джерела струму. Для підйому напруги акумулятори з'єднуються в батареї послідовно, утворюючи "стринг" [8] (з англійської string - нитку). На рис. 2.5 показано послідовне з'єднання шести акумуляторів в батарею.

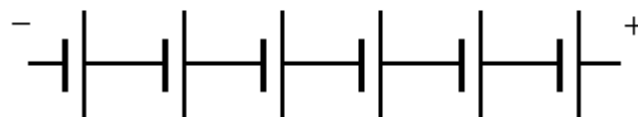


Рисунок 2.5 - Послідовне з'єднання акумуляторів в батарею

При послідовному з'єднанні напруга батареї дорівнює сумі напруг всіх її елементів, а ємність відповідає ємності одного акумулятора або батареї [1]

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6,$$

$$C = C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6.$$

Необхідна напруга акумуляторної батареї повинна відповідати напрузі живлення навантаження. Кількість елементів батареї розраховують по формулі:

$$N = \frac{U_H}{U_{EL}},$$

де  $U_H$  - напруга навантаження;

$U_{EL}$  - напруга зарядженого елемента батареї складає 1.2 В, для нікель-кадмієвих і нікель-металгідридних, 2.1 В – для свинцево-кислотних і 3.6 В – для літій-іонних акумуляторів.

Для забезпечення підвищеної ємності і потужності акумулятори з'єднуються паралельно (рис. 2.6).

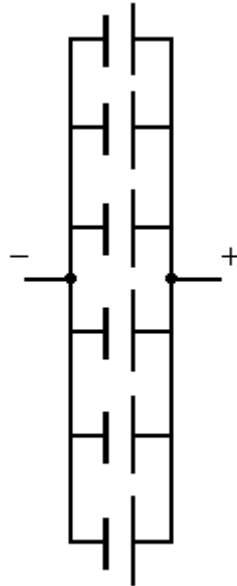


Рисунок 2.6 – Паралельне з'єднання акумуляторів в батарею

При паралельному з'єднанні загальна ємність рівна сумі ємностей всіх паралельних гілок, а напруга при цьому дорівнює напрузі на одному акумуляторі

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6$$

$$U = U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = U_5 = U_6$$

Типова ситуація, що приводить до деградації стринга: у середині свинцево-кислотної батареї з'явився акумулятор з більш слабкими характеристиками (відстаючий елемент) - через процес старіння в ньому зріс внутрішній опір, і знизилася ємність, яка віддається. У процесі розряду відстаючий елемент розряджається набагато швидше і висока імовірність, що він розрядиться до нуля тоді, коли сусідні елементи ще мають досить великий заряд. При подальшому розряді батареї розрядний струм сусідніх елементів буде діяти на відстаючий акумулятор, як зарядний струм через що на негативних пластинах відстаючого акумулятора утвориться двоокис свинцю (замість покладеного свинцю), а на позитивних пластинах - свинець (замість діоксиду свинцю). Описане явище називається переполюсування

(зміною полярності) акумулятора. Небезпека зміни полярності відстаючого акумулятора не тільки в тім, що він не працює, але й у тім, що не працюючий акумулятор різко знижує характеристики усього стринга (на нього витрачається велика кількість енергії). Паралельне з'єднання акумуляторів менш небезпечно, однак відстаючі акумулятори і тут знижують розрядні характеристики батареї.

Для паралельного з'єднання акумуляторних елементів варто пам'ятати про декілька нюансів. Перший - це те, що для з'єднання варто використовувати акумулятори не тільки однакової ємності, але й однакового внутрішнього опору. Другий - те, що опір сполучної перемички від клеми акумулятора до загального виходу батареї відноситься до внутрішнього опору джерела ЕРС, через що обов'язково варто ставити всі перемички однакового опору. Оскільки основне навантаження при паралельному підключенні йде на справно працюючі акумулятори, підвищується імовірність їхнього переходу в розряд відстаючих, що, в остаточному підсумку, веде до деградації всієї батареї.

Своєчасне виявлення відстаючих акумуляторів і виправлення ситуації - застава тривалого життя батареї. Особливо важливо, щоб основні параметри акумуляторів у батареї не розрізнялися більш, ніж на 5%. Необхідний щотижневий контроль напруги і температури після заряду на кожному акумуляторі (у відстаючих акумуляторів високий внутрішній опір і знижена ємність, при заряді такий акумулятор гріється сильніше, а також швидше відбувається стан перезаряду, що веде до “википання” електроліту). Для вентильованих батарей важливий параметр, який можна перевірити - щільність і рівень електроліту. Для прогнозування стану батареї в майбутньому корисно вести щоденник вимірів стану акумуляторів. При розкиді параметрів акумуляторів, близьких до граничних 5%, необхідно зробити еквалізацію (заряд, що вирівнює) батареї. Виявлені відстаючі акумулятори необхідно видаляти з батареї. Для уникнення зміни полярності

необхідно контролювати напругу на самому слабкому акумуляторі і вчасно, при досягненні нижньої межі напруги, перервати розряд батареї.

Заміна відстаючих акумуляторів, новими збільшує проблеми батареї - параметри нових акумуляторів краще вже циклізованих, тому небезпека зміни полярності може зрости.

Усе вище описане приводить до декількох висновків:

- необхідно підбирати акумулятори в батарею з найбільш близькими значеннями основних параметрів (ємність, напруга, внутрішній опір, рівень саморозряду, циклічність);
- батарея повинна мати запас ємності для зменшення імовірності зміни полярності;
- необхідний постійний контроль за станом акумуляторів у батареї (можливо, використання системи моніторингу і керування батареєю);
- має сенс підбирати батарею з альтернативних хімічних систем, у яких немає небезпеки зміни полярності і деградація параметрів окремого акумулятора сильно не впливає на параметри всієї батареї.

Широке практичне застосування першого методу знайшло в моделістів. Для живлення моделей у змаганнях життєво важливо підібрати легку і надійну батарею, що може витримати дуже жорсткі умови експлуатації: швидкий і могутній розряд, потім швидкий заряд і так 5...10 разів на добу. Виграють ті моделі, батареї яких можуть витримати цей режим протягом досить тривалого часу (2...3 днів) без деградації характеристик. Тому що в моделях використовуються малі по розмірах акумулятори, мається можливість закупівлі великої кількості елементів розсипом. Після декількох тренувальних циклів заряду/розряду перевіряються параметри напруги, ємності і внутрішнього опору. Складається каталог параметрів акумуляторів. З дуже схожих по характеристиках (розкид параметрів менш 1%) елементів збирається батарея. Про трудомісткість цього процесу можна судити по тому, що на підбір стринга із шести акумуляторів потрібно перебрати більше тисячі вихідних елементів. Навіть використання комп'ютеризації й

автоматизації основного процесу добору не сильно знижують трудомісткість. Такі стринги коштують у 3...4 рази дорожче, однак і працюють краще (при зборці батареї з розкидом параметрів акумуляторів у 5% сильно відстаючи з'являються після 10 інтенсивних циклів заряду/розряду, при використанні відібраних елементів - після 50 циклів) [7].

Для великих акумуляторів можна обмежитися менш твердим процесом добору (тому що є можливість створити додатковий запас ємності), що дозволить швидше підібрати стринг. Також, маючи пристойний запас ємності, можна видаляти сильно відстаючи елементи батареї без додавання нових, що знижує імовірність подальшого дисбалансу. Також гарний запас ємності збільшує кількість циклів заряду/розряду при частковому використанні батареї, причому ріст кількості циклів нелінійно зростає від зменшення глибини розряду.

Використання системи моніторингу і керування батареєю дозволяє перенести функцію контролю стану окремих елементів на контролер. У залежності від можливостей (визначають ціну системи керування), контролер може стежити за напругою, силою розрядного струму, кількістю циклів, температурою окремого елемента або групи елементів, деякі контролери можуть шунтувати струм при перевищенні припустимих величин навантажень на елемент. Для здешевлення системи керування батареєю має сенс збирати стринг із дуже ємних елементів, що дозволить обмежитися відносно невеликою кількістю контролерів. Яскравим прикладом такого підходу є широко використовувані літій-іонні батареї.

Альтернативні хімічні системи мають право на життя при зборці великої кількості акумуляторів в одну батарею. Гарний приклад такої системи - акумуляторні батареї ZEBRA для гібридного і електротранспорту.

## **Висновки за розділом 2**

З аналізу розглянутих акумуляторних батарей випливає, що найбільш доцільним варіантом, в даний час, для живлення гібридної силової установки

є нікель-металгідридні акумуляторні батареї, завдяки таким позитивним властивостям:

- велика ємність на 40% і більше, ніж звичайні NiCd батареї, і є потенціал для збільшення їх енергетичної щільності;
- менша виразність ефекту “пам'яті” - цикли обслуговування батареї можна проводити в 2...3 рази рідше;
- проста можливість транспортування - авіакомпанії перевозять без усяких попередніх умов;
- екологічно безпечні - можлива переробка.

Успіх розповсюдженого використання нікель-металгідридних батарей забезпечили висока енергетична щільність і нетоксичність матеріалів, вживаних при їх виробництві. В порівнянні з нікель-кадмієвими сучасні нікель-металгідридні батареї мають більш високу - майже на 40 % - енергетичну густину. Є можливість і для подальшого її підвищення.

В даний час нікель-металгідридні батареї поступово замінюють нікель-кадмієві при використуванні їх як джерело живлення для гібридних транспортних засобів. І в багатьох країнах цей процес підтримується законодавством з метою захисту навколишнього середовища від шкідливої дії токсичних відходів. Вартість нікель-металгідридних батарей практично порівнялася з вартістю нікель-кадмієвих батарей. Це відбулося завдяки великим об'ємам їх виробництва і стимуляції процесу переходу на їх використання.

## РОЗДІЛ 3 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ДЛЯ ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ

### 3.1 Аналіз характеристик електроприводів на основі традиційних електродвигунів

В загальних вимогах, які пред'являють до електроприводів у різноманітних областях сучасної техніки велику роль грають регульовані приводи, основу яких складають різноманітні типи електричних двигунів.

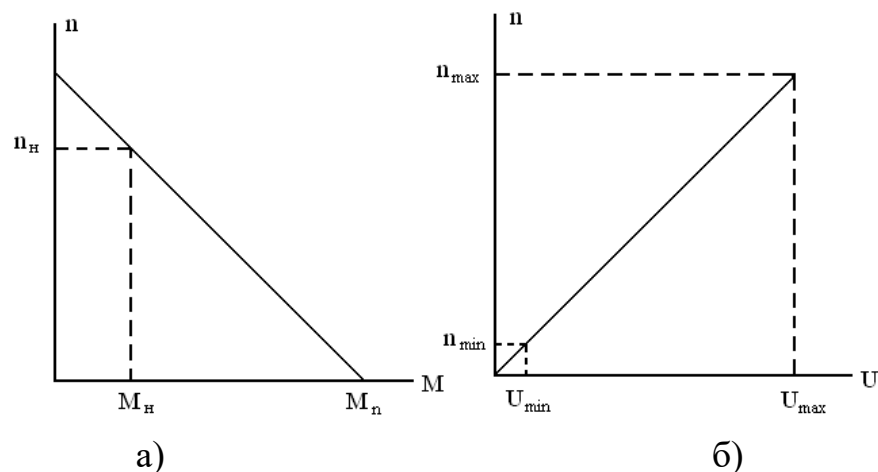
До електродвигунів, що входять до складу сучасного електропривода гібридного транспортного засобу пред'являються наступні вимоги:

- гарні пускові і регульовальні характеристики;
- відсутність необхідності в обслуговуванні;
- високі питомі показники, оцінювані по тривалому моменту, який розвивається, віднесеному до маси двигуна (Нм/кг).

**3.1.1 Колекторний двигун постійного струму.** Першій вимозі щонайкраще задовольняють колекторні двигуни постійного струму незалежного збудження, що володіють великою кратністю пускового моменту, лінійною регульовальною характеристикою, що забезпечує можливість досягнення великого діапазону регулювання  $n_{\max} : n_{\min}$ , де  $n_{\max}, n_{\min}$  - максимальна і мінімальна частоти обертання в процесі регулювання. Для сучасних високоточних приводів діапазон регулювання повинний мати порядок  $10^3 \dots 10^4$ . Типовий вид механічної і регульовальної характеристик колекторного двигуна незалежного збудження показаний на рис. 3.1 [15]. З рис. 3.1, а видно, що, якщо двигун працює в крапці механічної характеристики з номінальним моментом  $M_n$ , при номінальній швидкості обертання  $n_n$ , то кратність пускового моменту  $M_n$  стосовно номінального  $M_n / M_n$  може бути досить великою, особливо, якщо допустимо прямий пуск. З регульовальної характеристики рис. 3.1, б видно, що зміна напруги  $U$ , яка підводиться до двигуна в діапазоні  $U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$ , дозволяє в тому же

діапазоні  $n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$  змінювати швидкість по лінійному закону  $n = kU$ . Ця властивість, хоча й обумовлена деякими припущеннями, що спрощують, (наприклад, про відсутність нелінійності в характері навантаження й ін.), все-таки в головних рисах відображає поведінку двигуна в процесі регулювання і є дуже зручною у побудові регульованих систем електропривода.

Однак колекторні двигуни зовсім не задовольняють другу з названих раніше вимог. Справа в тому, що наявність щітково-колекторного апарата, що є, самою уразливою ланкою колекторного двигуна, робить необхідним його частий огляд, періодичний ремонт і заміну. В окремих випадках, таких як високошвидкісний ( $10^4$  об/хв) і надвисокошвидкісний ( $10^5$  об/хв) привід, застосування механічного колектора для тривалої роботи є взагалі неприпустимим.



а – механічна характеристика; б – регульовальна характеристика

Рисунок 3.1 – Характеристики колекторного двигуна незалежного збудження

Те ж саме можна сказати про роботу в агресивному середовищі, вплив якого на колектор і щітки різко знижує надійність і довговічність двигуна. Таким чином, двигун з механічним колектором не може розглядатися як

сучасний елемент електропривода гібридних транспортних засобів, до якого пред'являються підвищені вимоги по надійності.

**3.1.2 Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором.** Друга вимога щонайкраще задовольняється двигунами змінного струму (асинхронними і синхронними), які не містять ковзних електричних контактів. Єдиними елементами їхньої конструкції, що впливають на довговічність, є підшипники й обмотки.

Однак ці елементи в принципі властиві всім видам електричних машин і, крім того, сучасні конструктивні і технологічні удосконалення довели їхній рівень до ступеня, що задовольняє, як правило, вимогам, що припускають роботу без оглядів і обслуговування на весь термін експлуатації.

Проте, двигуни змінного струму не мають виду механічних і регулювальних характеристик, сприятливих з погляду регулювання частоти обертання й умов пуску. У цьому вони істотно уступають двигунам постійного струму.

**3.1.3 Порівняльний аналіз традиційних двигунів.** На підставі проведеного аналізу складена таблиця переваг і недоліків традиційних електричних двигунів з погляду можливості їхнього використання в складі сучасного регульованого приводу для гібридних транспортних засобів.

Оптимальне рішення по створенню виконавчого двигуна для сучасного, високодинамічного, точного і надійного електропривода для гібридних транспортних засобів могло б бути досягнуто, якби удалося сполучити в одному пристрої переваги колекторного двигуна постійного струму і синхронного двигуна зі збудженням від постійних магнітів. Це рішення дозволило б створити виконавчий двигун, що володіє наступним комплексом переваг:

- відсутність ковзних електричних контактів, висока надійність і довговічність;
- сприятливі механічні і регулювальні характеристики, простота керування моментом і швидкістю;

- висока кратність пускового моменту, мала механічна постійна часу, гарна динаміка;
- гарні енергетичні показники, завдяки застосуванню сучасних постійних магнітів;
- поліпшені умови тепловідводу;
- високі питомі показники по тривалому моменту, який розвивається, на одиницю маси двигуна.

Таблиця 3.1 - Переваги і недоліки електричних двигунів

| Тип двигуна                                                 | Переваги                                                                                                                                                                                                                           | Недоліки                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                           | 2                                                                                                                                                                                                                                  | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Колекторний двигун постійного струму з постійними магнітами | <ul style="list-style-type: none"> <li>- гарна керованість;</li> <li>- лінійність механічної і регульовальної характеристики;</li> <li>- велика кратність пускового моменту;</li> <li>- відсутність втрат на збудження.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- наявність механічного колектора і щіток, що знижують надійність і довговічність;</li> <li>- неможливість праці в агресивних і вибухонебезпечних середовищах без додаткових пристроїв герметизації;</li> <li>- утруднений тепловідвід при природному охолодженні.</li> </ul> |
| Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- відсутність ковзних контактів і висока надійність;</li> <li>- простота конструкції;</li> <li>- відносно невисока вартість;</li> <li>- задовільні умови тепловідводу.</li> </ul>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- низька кратність пускового моменту на природній характеристиці;</li> <li>- складна система керування швидкістю, що забезпечує гарну динаміку в сполученні з глибоким діапазоном регулювання;</li> <li>- додаткові втрати на створення потоку.</li> </ul>                    |

| 1                                                                  | 2                                                                                                                                     | 3                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Синхронний<br>двигун<br>зі збудженням<br>від постійних<br>магнітів | -відсутність ковзних<br>контактів і висока<br>надійність;<br>-відсутність утрат на<br>збудження;<br>-поліпшені умови<br>тепловідводу. | -неможливість прямого<br>пуску;<br>-обмежені можливості<br>регулювання швидкості<br>без внесення<br>конструктивних змін;<br>-підвищена вартість у<br>порівнянні з<br>асинхронним двигуном. |

Виходячи з аналізу приведеної таблиці, як електродвигун доцільно використовувати синхронну машину з постійним магнітом на роторі, що у сучасній літературі прийнято називати вентильним двигуном.

Вентильний двигун (рис. 3.2) (Selfcontrolled Synchronous Motor, Brushless DC-Motor) - двигун, у якому комутація секцій (фаз) обмотки статора (якоря) здійснюється за допомогою напівпровідникового комутатора, керованого сигналами, що дозволяють виявити положення ротора стосовно статора. Найчастіше ці сигнали виробляються спеціальним датчиком положення ротора (ДПР). Датчик положення ротора здійснює позиційний зворотний зв'язок у залежності від положення магнітної осі ротора стосовно еквівалентної магнітної осі статора. Цей позиційний зворотний зв'язок аналогічний функції, виконуваної колектором у машині постійного струму.



Рисунок 3.2 – Вентильний двигун

Завдяки відсутності механічного колектора вентильні двигуни, зберігаючи позитивні якості двигунів постійного струму по регульовальних і механічних характеристиках, мають високу надійність, велике відношення “момент на одиницю маси”, можливість створення високооборотних виконань двигунів без обслуговування в плинні всього терміну експлуатації. Вентильні двигуни з постійними магнітами створюються на потужності від часток Вт до декількох сотень кВт і частоти обертання до  $10^5$  об/хв. [16].

Переключення обмоток (секцій, фаз) вентиляного двигуна, здійснювані по сигналах з чуттєвих елементів ДПР, підкоряються строгої кутової періодичності, тобто здійснюються через цілком визначений кут повороту ротора. Цей кут визначається кутовим інтервалом розташування чуттєвих елементів на нерухомій частині ДПР. Процеси переключення обмоток або їхніх елементів здійснюються напівпровідниковими комутаторами. Комутатор вентиляного двигуна (Converter, Commutator, Inverter, Controller) - перемикаючий пристрій, що складається з напівпровідникових ключів, призначений для погодженої комутації фаз вентиляного двигуна по сигналах датчика положення ротора (ДПР) чи іншим сигналам, що виявляють це положення. По типу напівпровідникових елементів комутатори можуть бути побудовані на цілком керованих елементах (транзистори, ГТО-тиристори) і на не цілком керованих елементах (звичайні тиристори).

### 3.2 Конструкції двигунів

По конструкції вентильні двигуни виконуються як синхронна машина. Вони можуть мати циліндричне (рис. 3.3, а) або дискове (рис. 3.3, б, в) виконання.

Конструкція двигуна циліндричного типу містить (рис. 3.3, а):

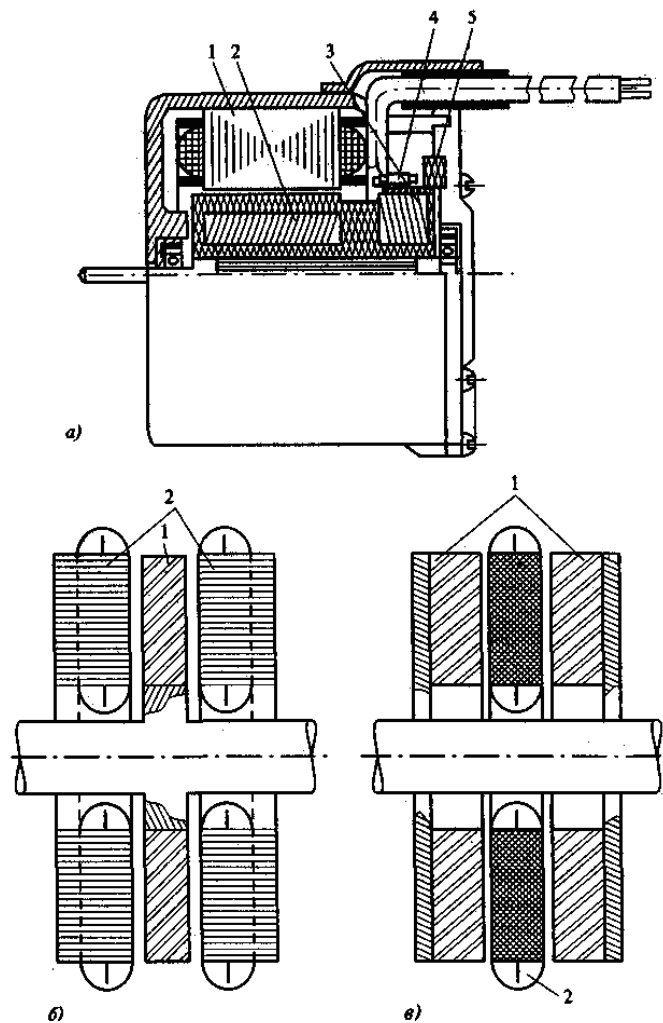
- 1 - статор з обмоткою, що містить  $m$  фаз (секцій);
- 2 - ротор збудженого чи незбудженого явнополюсного типу;
- 3 - рухлива частина датчика положення ротора - якір ДПР;
- 4 - чуттєвий елемент датчика положення ротора;

– 5 - обойма, на якій закріплені чуттєві елементи ДПР.

Деталі 4 і 5 утворюють нерухому частину ДПР, закріплену на статорі.

Таким чином, конструктивна відмінність вентильного двигуна від синхронної машини складається в наявності датчика положення ротора.

Дискові двигуни мають ротор у виді одного чи декількох дисків, на яких закріплені постійні магніти, що утворюють полюсну систему. По конструкції дискові двигуни бувають двох типів (рис. 3.3, б, в). На рис. 3.3, б двигун має дисковий ротор 1, розташований між двома статорами 2 з обмоткою. Статори 2 для зниження магнітних утрат виконуються зі сталевий стрічки (електротехнічна сталь) чи пресуванням з магнітопровідного порошку. На рис. 3.3, в двигун має ротор у виді двох дисків 1 утримуючих магніти, закріплені на сталевому магнітопроводі. Статор, розташований між дисками 1 у виді обмотки 2, закріпленої на дисковому діелектричному каркасі, як правило, не має ділянок, виконаних з магнітопровідного матеріалу. Конструкція двигуна, зображена на рис. 3.3, в називається беззубчатою чи безпазовою. У конструкціях рис. 3.3, б і рис. 3.3, в магніти намагнічуються в осьовому напрямку.



1 – дисковий ротор; 2 – статори з обмоткою

а – двигун циліндричного виконання; б, в – двигуни дискового виконання

Рисунок 3.3 – Конструктивні схеми вентильних двигунів

Треба відзначити, що найбільше поширення знайшли циліндричні двигуни. Застосування дискових двигунів найчастіше диктується можливостями компоновання, де іноді потрібна плоска конструкція виконавчого пристрою.

Дискові двигуни мають ряд специфічних особливостей технології виробництва, що не цілком відповідають традиційним технологіям, прийнятим для електричних машин. Усі ці фактори обмежують поки широке застосування дискових двигунів.

Виготовленням вентильних електричних машин займаються практично усі ведучі електромашинобудівельні компанії (“Siemens”, “Bosch”, “General Electric” і багато інших). Спеціально для нестатків автомобільного транспорту розробляють і виготовляють вентильні машини компанії “Toyota”, “Honda”, “Mitsubishi”, у тому числі і для установки в мотор-колеса електромобілів.

### **3.3 Аналіз енергетичних режимів тягових систем електромобілів**

Нафтові палива як джерело енергії володіють дуже високими питомими характеристиками: зокрема, в 1 кг бензину міститься 11,6 кВт·ч енергії. Акумулятори будь-яких можливих електрохімічних систем мають теоретичний запас енергії приблизно в 6...10 разів менший. З цієї причини питання раціонального використання енергії, яка мається на електромобілі є найважливішими для тягових електричних систем будь-яких типів.

Електричні тягові системи мають набагато менші втрати енергії, ніж системи з тепловими двигунами, у тому числі і з двигунами внутрішнього згоряння. Коефіцієнт корисної дії існуючих теплових двигунів складає 25...30 %, тому тільки близько 3 кВт·ч/кг початковій питомій енергії палива корисно використовується на виході двигуна.

Ступінь корисного використання енергії електрохімічного акумулятора (при сучасному стані техніки) може бути набагато вищим, а досягнутий рівень ККД електродвигунів складає 85...90 %. Таким чином, рівень питомої енергії електрохімічних джерел, що корисно використовується, може досягти 25...30 % від приведеної вище величини на виході теплового двигуна. Цей орієнтовний підрахунок показує, що, істотно програючи в початковій теоретичній енергії енергоносія, електричні тягові системи можуть частково компенсувати це при реалізації наявних можливостей більш ефективного її використання. Ця обставина має

важливе значення для оцінки перспектив розвитку електричних тягових систем, а також для правильного підходу до їх створення.

В основу дослідження енергетики тягових систем встановлений метод балансу енергії. Будь-яка тягова система складається з наступних енергетичних модулів, що здійснюють послідовне перетворення енергії: тягової акумуляторної батареї Б, контролера (пристрої управління, включаючи і силовий перетворювач, якщо такий є) К, тягового електродвигуна М, трансмісії ТР. Енергетична діаграма в загальному вигляді показана на рис. 3.4 [17].

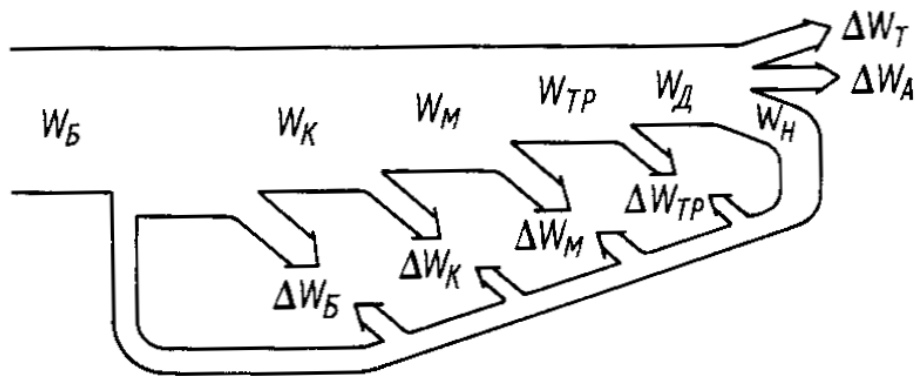


Рисунок 3.4 – Енергетична діаграма електромобіля

Ця діаграма ілюструє наступне рівняння балансу енергії

$$W_B + W_P = \Delta W_B + \Delta W_K + \Delta W_M + \Delta W_{TP} + \Delta W_T + \Delta W_A, \quad (3.1)$$

де  $W_B$  – енергія акумуляторної батареї;

$W_P$  – енергія рекуперації;

$\Delta W_B, \Delta W_K, \Delta W_M, \Delta W_{TP}$  – втрати енергії в модулях тягової системи - батареї, контролері, електродвигуні, трансмісії;

$\Delta W_T, \Delta W_A$  – складові втрат енергії при русі, затрачувані на тертя качіння і аеродинамічні втрати енергії відповідно.

Крім того, на рис. 3.3 показані:  $W_K, W_M, W_{TP}$  - енергія на вході відповідних модулів тягової системи;  $W_D$  - енергія, необхідна для руху;  $W_H$  - накопичена при русі енергія.

Верхня гілка енергетичної діаграми відображає режим руху електромобіля, при якому всі складові витрати енергії покриваються за рахунок енергії батареї. Нижня гілка діаграми умовно показує шлях енергії і її втрати при поверненні енергії в батарею. Частіше всього в кожний момент часу існує тільки один з вказаних двох напрямів передачі енергії, що відповідає основним енергетичним режимам: споживання енергії батареї, який назвемо скорочено тяговим; повернення енергії в батарею, або інакше - рекуперації.

Окрім основних режимів, існує ще ряд енергетичних режимів. Якщо енергія батареї не споживається, тобто  $W_B = 0$  і повернення енергії також відсутнє, тобто,  $W_P = 0$  то втрати енергії при русі покриваються за рахунок накопиченої енергії і замість виразу (3.1) маємо

$$\Delta W_T + \Delta W_A = W_H. \quad (3.2)$$

Такий режим руху прийнято називати накатом.

Якщо до втрат енергії при русі додати втрати енергії в механічних гальмах, віднісши їх до втрат в трансмісії при гальмуванні  $\Delta W'_{TP}$ , то отримаємо рівняння балансу енергії в режимі механічного гальмування

$$\Delta W_T + \Delta W_A + \Delta W'_{TP} = W_H. \quad (3.3)$$

Існують ще два відомі режими електричного гальмування, при яких накопичена при русі енергія не повертається в її джерело. В режимі динамічного гальмування енергія від батареї не споживається, і рівняння балансу має вигляд

$$\Delta W_T + \Delta W_A + \Delta W_{TP} + \Delta W_M + \Delta W_E = W_H. \quad (3.4)$$

В режимі гальмування противовключенням додатково споживається енергія від батареї

$$\Delta W_T + \Delta W_A + \Delta W_{TP} + \Delta W_M + \Delta W_K + \Delta W_B = W_B + W_H. \quad (3.5)$$

Хоча і прагнуть замінити режим гальмування противовключенням одним з більш економічних гальмівних режимів, тобто не пов'язаних з відбором енергії з батареї, проте, в певних специфічних формах він може реально існувати. Наприклад, в схемах тягового електроприводу з тиристорними імпульсними перетворювачами (рис. 3.3) від батареї може споживатися енергія, необхідна для комутації тиристорів. Крім того, від батареї також споживається енергія, яка потрібна для збудження двигуна, живлення системи управління (контролера) і т.п.

Рівняння балансу енергії є інтегральними, тобто в них розглядаються процеси обміну енергією за якийсь проміжок часу або шляху електромобіля. У зв'язку з цим відбір енергії батареї на збудження тягового двигуна, живлення системи управління і на інші допоміжні потреби може в середньому компенсуватися за рахунок інших складових. Це дозволяє не розглядати без необхідності режим гальмування противовключенням.

Окрім балансу енергії прийнято у ряді випадків розглядати рівняння балансу потужності, який є первинним по відношенню до балансу енергії. Проте умови експлуатації міського транспорту характеризуються циклічними змінами режимів руху транспортних засобів. У зв'язку з цим практично велику цінність представляє баланс енергії, що складається для певного розрахункового циклу руху. Опис стандартизованих циклів руху електромобілів приводиться нижче.

Найбільше застосованим для міських електромобілів є стандартний випробувальний міський цикл (500 метровий цикл). Тому порівняння характеристик тягових систем і їх аналіз доцільно проводити саме для цього циклу, який скорочено надалі називатимемо просто циклом “С”. Для циклових розрахунків рівняння балансу енергії дає значно більше інформації, ніж рівняння балансу потужності; крім того, дуже важливим показником для порівняння різних електромобілів є питома витрата енергії за цикл, зокрема для циклу “С” маємо

$$\omega_c = \frac{W_B}{GL_c}, \quad (3.6)$$

де  $G$  – повна маса електромобіля, т;

$L_c$  – пробіг за цикл руху, км;

$W_B$  – споживання енергії від батареї за цикл, Вт·ч.

Складові балансу потужності і балансу енергії. Потужність, відповідна втратам енергії на тертя качіння  $\Delta W_T$ , звичайно визначається у вигляді

$$P_T = Gf\nu, \quad (3.7)$$

де  $\nu$  - швидкість руху, м/с;

$f$  - коефіцієнт опору качінню, який при швидкостях руху менше 60...80 км/ч можна вважати постійним і рівним для доріг з асфальтовим покриттям 0.012...0.018.

Потужність, відповідна аеродинамічним втратам енергії  $\Delta W_A$  при русі, визначається по формулі

$$P_A = k_B F_B \nu^3, \quad (3.8)$$

де  $k_B$  - коефіцієнт обтічності, Н·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>;

$F_B$  - лобова площа транспортного засобу, м<sup>2</sup>.

За наявності вітру попутна складова його змінює величину аеродинамічних втрат згідно виразу

$$P_A = k_B F_B (\nu \pm \nu_B)^3.$$

Потужність, що йде на накопичення кінетичної енергії електромобіля, визначається у вигляді

$$P_K = \pm \frac{G}{g} \delta j \nu, \quad (3.9)$$

де  $\delta$  - коефіцієнт обліку мас, що обертаються (визначається шляхом приведення до швидкості поступального руху);

$j$  - прискорення (або уповільнення) електромобіля.

Зміна потенційної енергії, що запасється при русі електромобіля на підйом, часто не враховується, або враховується тільки у вигляді втрат енергії при русі на підйом. Проте для циклічних режимів і внутрішньоміських замкнутих маршрутів потужність, затрачувана при русі на підйом, на ухилі буде рушійною, тобто

$$P_H'' = \pm G \nu \sin \alpha, \quad (3.10)$$

де  $\alpha$  - кут підйому.

Очевидно, що для зменшення питомої витрати енергії на рух необхідне ретельне вивчення всіх компонентів конструкції електромобіля, у тому числі визначаючих аеродинамічний опір, опір качіння і ін. Проте для виявлення шляхів вдосконалення тягових систем доцільно зупинитися на таких питаннях, як відносні можливості електричного рекуперативного

гальмування, а також порівняльна роль окремих агрегатів тягової системи в загальній витраті енергії.

Визначимо складові витрати енергії по циклу “С”, які, у принципі, не залежать від тягової системи.

Такою складовою є перш за все кінетична енергія  $W'_H$  згідно виразу (3.9). Далі до числа таких складових можна віднести енергію руху при сталій швидкості

$$W'_{Д} = \Delta W_T + \Delta W_A = (P_T + P_A)t_{cr}, \quad (3.11)$$

а також при русі канатом

$$W'_{Д.В} = \int_0^{t_{co}} (P_T + P_A) dt. \quad (3.12)$$

Тимчасові інтервали позначені відповідно до прийнятих для стандартного циклу.

Енергія, затрачувана на рух екіпажа при розгоні і гальмуванні, залежить від характеру зміни швидкості  $v = v(t)$  на цих інтервалах.

Вважатимемо, що закон зміни швидкості в циклі - лінійний.

Витрати енергії на рух при розгоні

$$W'_{Д.Р} = \int_0^a (P_T + P_A) dt, \quad (3.13)$$

при гальмуванні

$$W'_{Д.Т} = \int_0^{t_b} (P_T + P_A) dt. \quad (3.14)$$

Очевидно, що для кожного електромобіля може бути визначена величина витрати енергії на рух за цикл “С” по формулі

$$W'_C = W'_D + W'_{D.B} + W'_{D.P} + W'_{D.T}. \quad (3.15)$$

Ця сума представляє деяку оцінку граничних для даного електромобіля витрат енергії при повному використуванні (рекуперації) накопиченої (кінетичної) енергії. Відповідно можна визначити питомі витрати енергії

$$\omega'_C = W'_C / (GL_C). \quad (3.16)$$

Для зіставлення визначимо витрати енергії на рух без рекуперації, проте врахуємо при цьому, що рух накатом здійснюється за рахунок запасу кінетичної енергії. В цьому випадку

$$W''_C = W'_C + W''_H - W'_{D.B}, \quad (3.17)$$

і питомі витрати енергії

$$\omega''_C = W''_C / (GL_C). \quad (3.18)$$

Маючи дані з виразів (3.16) і (3.18), можна визначити значення рекуперації енергії для даного електромобіля, а порівнюючи ці величини з показниками питомої витрати енергії для електромобіля в цілому, знайти відносну якість тягової системи.

Як приклад, що має і самостійне значення, нижче приведені дані по розрахункових значеннях витрати енергії на рух для електромобіля Газель.

Таблиця 3.2 - Витрати енергії на рух для електромобіля Газель, Вт·ч

|                                                  |       |
|--------------------------------------------------|-------|
| кінетичної енергії, $W'_H$                       | 74.1  |
| енергії руху, при встановленій швидкості, $W'_D$ | 47.9  |
| енергії на рух при розгоні, $W'_{D.P}$           | 17.1  |
| енергії на рух при гальмуванні, $W'_{D.T}$       | 6.8   |
| енергії при русі канатом, $W'_{D.B}$             | 16.0  |
| енергії на рух за цикл "С", $W'_C$               | 87.8  |
| енергії на рух при рекуперації, $W''_C$          | 145.9 |

Питома витрата енергії на рух для електромобіля Газель, становить, Вт·ч/(т·км) –  $\omega'_c = 54.5$ ,  $\omega''_c = 90.6$

З приведених вище даних виходить, що накопичена електромобілем кінетична енергія при русі по циклу "С" достатньо велика і порівняна з витратою енергії на рух. Це означає, що використання енергії за рахунок ухвалення ряду спеціальних заходів по її рекуперації, у тому числі, заходів, які вимагають додаткових витрат, має щонайменше енергетичне обґрунтування. Економічне обґрунтування цих витрат також можливо, але вимагає додаткових характеристик тягової батареї.

Розглянемо на прикладі електромобіля Газель з двигуном незалежного збудження і двозонним регулюванням, розподіл втрат в тяговій системі. Для визначеності як тягова розглядається батарея типу 12х6ЭМ60, свинцево-кислотна, місткістю 60 А·ч, на напругу 144 В. Розподіл втрат енергії в агрегатах тягової системи при русі з постійною швидкістю 40 км/ч приведено в табл. 3.3.

З цієї таблиці виходить, що основна складова втрат доводиться на електродвигун, а наступні по величині втрати енергії виникають в трансмісії. Проте тільки по розподілу втрат в сталому режимі ще не можна робити висновки про якість тягової системи в даному варіанті і можливостях поліпшення окремих модулів або енергосистеми в цілому.

Таблиця 3.3 – Розподіл втрат при русі електромобіля Газель з постійною швидкістю

| Модуль     | $P$ , кВт | $\Delta P$ , кВт | $\eta$ , % |
|------------|-----------|------------------|------------|
| Батарея    | 12.095    | 0.211            | 0.983      |
| Контролер  | 11.884    | 0.152            | 0.987      |
| Двигун     | 11.732    | 1.841            | 0.843      |
| Трансмісія | 9.891     | 0.650            | 0.930      |

Розглянемо розподіл втрат по модулях тягової системи при русі по циклу “С” порівняно із сталим режимом руху; причому для наочності зіставлятимемо величини питомих втрат, тобто втрат, віднесених до повної маси електромобіля

$$\omega_1 = \Delta W_1 / (GL_C). \quad (3.19)$$

Результати цих розрахунків, а також відносна величина питомих втрат  $\omega_i / \omega_{T.C}$  у відсотках приведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Питомі втрати при русі по циклу “С” і з постійною швидкістю

| Режим руху | Складові втрат $\frac{Вт \cdot ч / (т \cdot км)}{\%}$ |                    |                     |                    |                    |             |              |            |
|------------|-------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------------|--------------|------------|
|            | $\omega_B$                                            | $\omega_K$         | $\omega_M$          | $\omega_{TP}$      | $\omega_{T.C.}$    | $\omega'_C$ | $\omega''_C$ | $\omega_C$ |
| 40 км/ч    | $\frac{1.5}{7.5}$                                     | $\frac{1.1}{5.6}$  | $\frac{12.8}{64.6}$ | $\frac{4.5}{22.7}$ | $\frac{19.8}{100}$ | -           | 64.2         | 84.0       |
| Цикл «С»   | $\frac{6.2}{13.2}$                                    | $\frac{6.1}{13.1}$ | $\frac{25.7}{55.0}$ | $\frac{8.7}{18.6}$ | $\frac{46.7}{100}$ | 54.5        | 90.6         | 106.3      |

З таблиці виходить, що основна частка втрат в тяговій системі даного типу відноситься до електродвигуна. Для конструктивно оптимізованого, а

по алгоритмах управління, що використовуються, - близького до оптимального виконання контролера втрати енергії порівняно невеликі, у тому числі і для руху по циклу. При швидкості руху 40 км/ч силовий перетворювач в ланцюзі якоря знаходиться в стані насичення, і втрати в ньому складають всього 152 Вт. Можна відзначити досить велику величину втрат енергії в трансмісії, що звичайно не привертає уваги конструкторів електромобілів. У зв'язку з цією обставиною потрібне додаткове вивчення питань застосування передач, що перемикаються, оскільки в таких передачах можливі ще більш помітні втрати енергії.

Зі зведених даних видно, що витрати енергії при постійній швидкості 40 км/ч, рівні 84 Вт·ч/т·км, в основному визначаються витратою енергії на опір руху електромобіля, коефіцієнт корисної дії тягової системи при цьому виявляється достатньо високим і рівним 0.764. Для руху по циклу (в даному випадку по циклу "С") ККД тягової системи можна визначити звичайним способом, але не переходячи до величин абсолютних витрат енергії

$$\eta_{т.с} = \frac{\omega_c - \omega_{т.с}}{\omega_c},$$

$$\eta_{т.с} = \frac{106.3 - 46.7}{106.3} = 0.561.$$

Помітимо, проте, що в сумарній витраті енергії  $\omega$  є певна частина втраченого запасу кінетичної енергії. Ступінь корисного використання кінетичної енергії шляхом її рекуперації можна оцінити, якщо врахувати граничні показники  $\omega'_c$  і  $\omega''_c$ . Питома витрата енергії  $\omega_c$  знаходиться у середині проміжку наступного вигляду

$$\omega'_c + \omega_{т.с} < \omega_c \leq \omega''_c + \omega_{т.с}, \quad (3.20)$$

тобто обмеженого граничним використанням кінетичної енергії і втратами без рекуперації.

Введемо коефіцієнт використання кінетичної енергії по наступній формулі

$$k = \frac{\omega'_c + \omega_{T.C} - \omega_c}{\omega''_c + \omega_{T.C} - (\omega'_c + \omega_{T.C})}. \quad (3.21)$$

При зміні  $\omega_c$  в межах інтервалу (3.20) цей коефіцієнт змінюватиметься від нуля за відсутності рекуперації, що відповідає верхній межі інтервалу (3.20), до одиниці при граничному використуванні кінетичної енергії. Зрозуміло, що другий випадок не може бути досягнутий в реальних системах і повинен також розглядатися як межа для виразу (3.21).

Замість формули (3.21) може використовуватися більш простий еквівалентний вираз

$$k_{II} = \frac{\omega''_c + \omega_{T.C} - \omega_c}{\omega''_c - \omega'_c}. \quad (3.40)$$

Для даного прикладу електромобіля Газель маємо

$$k_{II} = \frac{46.7 + 90.6 - 106.3}{90.6 - 54.5} = 0.85,$$

що можна вважати достатньо високим значенням.

### Висновки за розділом 3

Вентильні двигуни в даний час є самими перспективними з усіх типів електродвигунів, застосовуваних у сучасних регульованих електроприводах електромобілів або у складі гібридних силових установках автомобілів.

Більшість розвинутих країн широко упроваджує високотехнологічну електротехнічну продукцію, яка не тільки вирішує питання зниження

енергоспоживання, але і дозволяє створювати електротехнічні комплекси з малим виділенням втрат і з низкою нових якостей. Успіхи в області силової і мікропроцесорної техніки відкрили сприятливі умови для створення нового покоління електроприводів на базі вентильних електродвигунів. Практично всі ведучі електротехнічні фірми миру освоюють в даний час випуск таких електродвигунів.

У вентильних приводів, по відношенню до існуючих типів електричних машин, є ряд очевидних переваг:

- відсутність ковзаючих електричних контактів, істотно підвищує ресурс і надійність в порівнянні з електродвигунами постійного струму або асинхронними з явно вираженою обмоткою на роторі;
- високі показники ККД  $> 90\%$  і  $\cos \varphi > 0.95$  (у асинхронних електродвигунів  $\text{ККД} < 86\%$  і  $\cos \varphi < 0.86$ );
- незначні зміни ККД і  $\cos \varphi$  при зміні навантаження двигуна по потужності і при коливаннях напруги живлячої мережі;
- можливість регулювання частоти обертання по різних законах;
- мінімальне значення струмів холостого ходу і робочих струмів, що дозволяє точно виміряти навантаження на привід і оптимізувати режим роботи;
- низький перегрів електродвигуна, що особливо важливо при роботі в нестандартних режимах з можливими перевантаженнями;
- більш високий термін служби через зростання ресурсу ізоляційних матеріалів, що працюють при більш низьких температурах;
- збільшення ресурсу електродвигуна і всього агрегату за рахунок можливості оптимізації режимів роботи по швидкості і навантаженню;
- забезпечення вибухобезпечності;
- ефективна робота з різними змінними навантаженнями у зв'язку з наявністю сильного потоку збудження і невисокої індуктивності ланцюга якоря.

## **РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ**

### **4.1 Загальні засади визначення показників надійності**

Надійність - властивість об'єкту виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників в заданих межах (відповідних заданим режимам і умовам використання, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання і транспортування). Надійність є комплексною властивістю, яка залежно від призначення об'єкту і умов її експлуатації може включати безвідмовність, довговічність, ремонтпригожість і збереженість окремо, або певне поєднання цих властивостей як для об'єкту, так і для його частин [18].

Безвідмовність - властивість об'єкту безперервно зберігати працездатність протягом деякого часу або деякого напрацювання. Довговічність - властивість об'єкту зберігати працездатність, до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонтів. Збереженість - властивість об'єкту безперервно зберігати справний і працездатний стан на протязі і після зберігання і (або) транспортування.

Справний стан - стан об'єкту, при якому він відповідає всім вимогам, встановленим нормативно-технічною документацією.

Пошкодження - подія, що полягає в порушенні справності об'єкту або його складових частин унаслідок впливу зовнішніх дій, що перевищують рівні, встановлені в нормативно-технічній документації на об'єкт. Відмова - подія, що полягає в порушенні працездатності об'єкту.

Показник надійності - кількісна характеристика одного або декількох властивостей, що становлять надійність об'єкту.

Проблемою надійності в техніці займається навчальна дисципліна "Теорія надійності". Об'єктом "Теорії надійності" є "відмова", а її предметом є закономірності виявлення і усунення відмов, які призводять до підтримання необхідної надійності у часі.

## 4.2 Розрахунок надійності конденсаторів

Відповідно до завдання на кваліфікаційну магістерську роботу необхідно визначити характеристики надійності накопичувачів енергії на прикладі одного з типів конденсаторів з урахуванням електричних характеристик цього класу і типу накопичувачів енергії.

Аналіз статистичних даних по експлуатації конденсаторів свідчить, що характерним видом відмов конденсаторів є пробої конденсатора, які призводять до його внутрішнього короткого замикання.

Можна вважати, що основною причиною пробою конденсатора при правильно вибраному номінальному значенні робочої напруги є тепловий пробій.

В цьому випадку пробій відбувається усередині циліндрового провідного каналу, що проходить через діелектрик від одного електрода до іншого. Якщо позначити:

$T$  - температуру каналу;

$T_0$  - температуру електродів;

$q$  і  $h$  - перетин і довжина каналу;

$\sigma$  - електропровідність діелектрика в каналі;

$E$  - напруженість електричного поля в діелектриці;

$\beta$  - коефіцієнт тепловіддачі з каналу в діелектрик і до електродів,

то для умови балансу тепла в каналі при проходженні струму, необхідно забезпечити рівність

$$\sigma E^2 q h = \beta (T - T_0) h.$$

Відомо, що електропровідність змінюється від температури згідно із таким законом

$$\sigma = A e^{\frac{B}{T}} \cong \sigma_0 e^{\alpha(T-T_0)},$$

отже

$$\sigma_0 q E^2 e^{\alpha \Delta \theta} = \beta \Delta \theta,$$

де  $\Delta \theta = T - T_0$ .

Будуючи залежності

$$y_1 = e^{\alpha \Delta \theta} = f_1(\Delta \theta) \quad \text{і} \quad y_2 = \frac{\beta}{\sigma_0 q E^2} \Delta \theta = f_2(\Delta \theta),$$

легко визначити значення  $\Delta \theta$ , відповідне підвищенню температури в каналі. У міру підвищення  $E$  почне зростати  $\Delta \theta$  і при деякому значенні  $E = E_{кр}$ , коли пряма  $y_2 = f_2(\Delta \theta)$  стане дотичною до кривої  $y_1 = f_1(\Delta \theta)$ , матиме місце необмежене зростання температури - тепловий пробій. При цьому між електродами виникне коротке замикання. Значення  $E = E_{кр}$  знайдеться з умови

$$\frac{dy_1}{d(\Delta \theta)} = \frac{dy_2}{d(\Delta \theta)} \quad \text{або} \quad \alpha e^{\alpha \Delta \theta} = \frac{\beta}{\sigma_0 q E^2}.$$

Звідки витікає, що

$$E_{кр} = \sqrt{\frac{\beta}{\sigma_0 q \alpha e^{\alpha \Delta \theta}}} = E_{кр0} e^{-\alpha_1 \Delta \theta},$$

$$\text{де} \quad \alpha_1 = \frac{\alpha}{2}.$$

Якщо вважати

$$E_{кр} = \frac{U_{кр}}{h} = \frac{U_{кр}}{h_0 - k t^\gamma} = \frac{U_{кр}}{h_0} \frac{1}{\left[1 - \frac{k}{h_0} t^\gamma\right]}$$

і підставимо замість  $E_{кр}$  його значення, то при  $\gamma \cong 1.0$

$$U_{кр} = E_{кр0} h_0 \left[ 1 - \frac{k}{h_0} t^\gamma \right] e^{-\alpha_1 \Delta \theta} = U_{кр0} [1 - a_1 t] \times e^{-\alpha_1 \Delta \theta}.$$

Такі значення  $E_{кр}$  та  $U_{кр}$  гарантує відсутність коротких замикань від теплового пробою.

Далі, розрахуємо надійність конденсатора, по формулі

$$P_a = e^{-\lambda t}.$$

де  $\lambda$  - інтенсивність відмов конденсатора;

$t$  - тривалість його дії.

Для значення  $\lambda$ , згідно з [20], справедлива залежність

$$\lambda \cong \frac{dq}{d(\Delta x)} \cdot \frac{d(\Delta x)}{dt} = \frac{dq}{d(\Delta U)} \cdot \frac{d(\Delta U)}{dt}.$$

Так як  $\Delta U = \bar{U}_{кр0} - U$ , то

$$\frac{dq}{d(\Delta U)} = -\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta U^2}{2\sigma^2}},$$

тому значення  $\lambda$  визначається, рахуючи  $\bar{U}_{кр} = \bar{U}_{кр0} (1 - \alpha_i t)$  і  $U = U_n = const$ ,

як

$$\lambda \cong \frac{\bar{U}_{кр0} a_1 e^{-\alpha_1 \Delta \theta}}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(U_n - \bar{U}_{кр})^2}{2\sigma^2}}.$$

Так як  $\alpha_1 = \alpha_{01} e^{\alpha \Delta \theta}$ , припустимо  $\alpha_2 = \alpha - \alpha_1$ , одержимо

$$\lambda \cong \frac{\bar{U}_{кр0} a_{01} e^{-\frac{(U_n - \bar{U}_{кр0})^2}{2\sigma^2}}}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\alpha_2 \Delta \theta} = \lambda_0 e^{\alpha_2 \Delta \theta - \gamma \left[ \eta \frac{U_n}{U_{n0}} - 1 \right]},$$

де  $\eta = U_{n0} / \bar{U}_{кр0}$ ;

$$\gamma = \overline{U}_{kp0}^2 / 2\sigma^2.$$

Значення  $\lambda$  можна виразити також з допомогою емпіричних залежностей

$$\lambda_0 = \lambda_0 e^{\alpha_0(o_x - o_0) + \gamma(U_x - U_n)^\beta},$$

або

$$\lambda_0 = \lambda'_0 \left[ a + \left( \frac{U_x}{U_n} \right)^m \right] e^{\alpha_0(o_x - o_0)}.$$

Між значеннями  $\lambda_0$  і  $\lambda'_0$  існує залежність

$$\lambda'_0 = \frac{\lambda_0}{a + 1}.$$

Крім того, реальний конденсатор має опір витoku  $R_y \neq \infty$ . Тоді надійність по відношенню до параметричних (неповних) відмов полягає в тому, що імовірність того, що ємність конденсатора або його опір витoku лежать в заданих межах

$$P_b = \frac{1}{\Delta_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_{kp}} e^{-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\Delta_x^2}} dx,$$

де  $\bar{x}$  - середнє значення параметра (ємності або опору витoku);

$\Delta_x$  - середньоквадратичне відхилення параметру;

$x_{kp}$  - критичне значення параметру, яке відповідає допустимим змінам.

Середнє значення опору витoku залежить від температури  $\theta_x$  і прикладеної напруги  $U_x$

$$\overline{R}_y = \overline{R}_{y0} e^{-\alpha_0(o_x - o_n) - \beta'(U_x - U_n)} = \overline{R}_{y0} e^{-\alpha_0(o_x - o_n) - \beta(E_x - E_n)},$$

де  $E_x$  - напруженість поля,  $E_x = U_x / h$ ;

для паперових конденсаторів можна вважати  $\alpha_0 = 0.086 \cdot 1/^\circ C$  і  $\beta = 0.015 \text{ 1/мм}^2$ .

Залежність опору витoku від відносної вологості  $z$

$$\bar{R}_y = \bar{R}_{y0} e^{-x(z-z_0)}$$

і, відповідно

$$\bar{R}_y = \bar{R}'_{y0} e^{-\alpha_0(0_x-0_n)-\beta(E_x-E_n)-x(z-z_0)}.$$

Середнє значення ємності конденсатора

$$\bar{C} = \frac{\bar{\varepsilon} \bar{S}}{\bar{h}} = \frac{\varepsilon_n [1 + \alpha_\varepsilon (0_x - 0_n) \bar{S}]}{\bar{h}} \left( 1 + \frac{\Delta h_0}{\bar{h}_0} \right),$$

де  $\varepsilon$  - діелектрична постійна;

$\bar{S}$  - площа обкладок;

$h_0$  - початкове значення товщини діелектрика;

$\Delta h = k_{po} e^{\alpha \Delta \theta} t^\gamma$  - зміна (дійсна та еквівалентна) товщини діелектрика

при старінні ( $\Delta \theta = \theta_x - \theta_n$ );

$\alpha_\varepsilon$  - температурний коефіцієнт зміни діелектричної постійної матеріалу.

Таким чином, приведені оцінки надійності накопичувачів енергії припускають визначення величини інтенсивності відмов елемента залежно від величин певних електричних параметрів цього пристрою.

Але, через відсутність конкретних розрахункових даних по величинах електричних характеристик аналізованих накопичувачів енергії і за завданням керівника на кваліфікаційну роботу вибраний шлях визначення величини інтенсивності відмов за довідковими даними, приведеними у

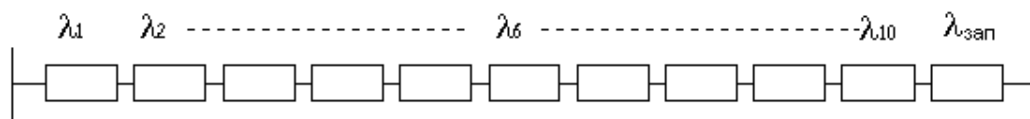
відкритому друці. Розглянутий варіант електричної схеми, складається з 10 елементів [19], сполучених послідовно один за одним, тоді структурна схема надійності такого пристрою може бути представлена на рис. 4.1.

Відповідно до цього, інтенсивності відмов плавких запобіжників складають  $\lambda_{зан} = 0.5 \cdot 10^{-6}$  1/год. А елементи накопичення електричної енергії конденсаторної батареї мають значення  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots \lambda_{10} = 0.15 \cdot 10^{-6}$  1/год. Конденсатори вибрані так, що при виході з ладу будь-якого з них батарея не виконує своїх функцій, тобто з погляду надійності вона відмовляє.

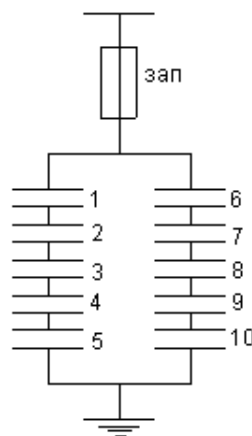
Відмовляє вона також при перегоранні запобіжника 1. Отже, ми сформулювали поняття відмови - при відмові будь-якого з елементів система відмовляє.

Сумарна інтенсивність відмов конденсаторної батареї складе, 1/год

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{n=1}^{10} \lambda_i = (10 \cdot 0.15 \cdot 10^{-6} + 0.5 \cdot 10^{-6}) = 2 \cdot 10^{-6}.$$



б



а

а – конденсаторна батарея; б – розрахункова схема

Рисунок 4.1 - Схема структурна надійності конденсаторної батареї

Вірогідність безвідмовної роботи батареї за рік (1 рік=8000 год) дорівнює

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t} = e^{-2 \cdot 10^{-6} \cdot 8000} = 0.983.$$

Результат розрахунку доводить, що надійність неремонтованої батареї конденсаторів, за 1 рік безперервної роботи, складає 0.983. При нормативному значенні  $P(t) = 0.95$  необхідно передбачити щорічне технічне обслуговування з прийняттям необхідних заходів підвищення її надійності по результатам технічного обслуговування (рис. 4.2).

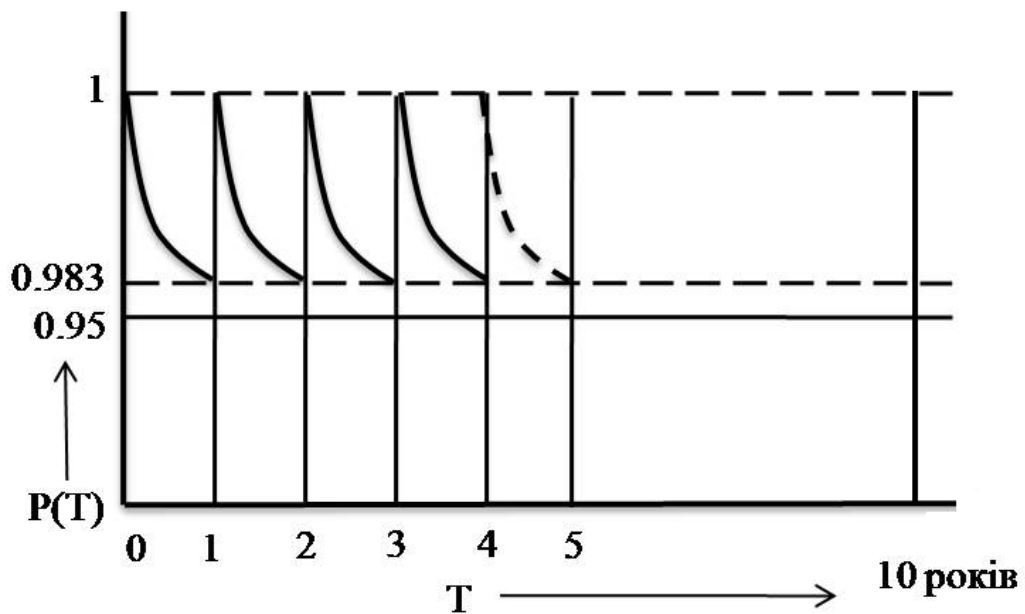


Рисунок 4.2 - Залежність імовірності безвідмовної роботи конденсаторної батареї від тривалості експлуатації

#### Висновки за розділом 4

1. Визначено загальні засади оцінки надійності роботи елементів силових агрегатів гібридних транспортних засобів;
2. Складено розрахункову структурну схему надійності конденсаторної батареї
3. Визначено вірогідність безвідмовної роботи батареї за рік

## **ВИСНОВКИ**

1. В роботі проведено порівняльний аналіз технологічних систем накопичення енергії в гібридних транспортних засобах. Визначено перспективні до подальшого використання засоби накопичення та перетворення енергії в гібридних транспортних засобах;
2. Встановлено основні енергетичні залежності перетворення енергії в силових агрегатах гібридних транспортних засобів та розроблено відповідну методику їх визначення;
3. На підставі попереднього аналізу засобів акумулювання енергії в гібридних транспортних засобах та режимах їх роботи проведено порівняльний техніко-економічний аналіз систем накопичення енергії реалізованих на базі акумуляторів різних типів;
4. Намічено напрямки подальшої наукової роботи.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Бажинов О.В., Смирнов О.П., Сєріков С.А., Гнатов А.В., Колесніков А.В. “Гібридні автомобілі”. – Харків, ХНАДУ, 2022. – 327 с.
- 2 Stanley Robert Holm, “Modelling and optimization of a permanent magnet machine in a flywheel”. Ridderprint Offsetdrukkerij B.V.Pottenbakkerstraat, 2984 AX Ridderkerk, The Netherlands, 2003.
- 3 P.Ross. “10 Techno-Cool Cars”. In IEEE Spectrum, February 2003.
- 4 A. Ter-Gazarian. Energy Storage for Power Systems, volume 6 of IEE Energy Series. Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1994.
- 5 B. Nelson. “TMF Ultra-High Rate Discharge Performance Going Boldly Where No Batteries Have Gone Before”. In Proceedings of the 12th Annual Battery Conference on Applications and Advances, pages 139–143, Long Beach, CA, USA, 1997.
- 6 Бажинов О.В., Трунова І.С., “Аккумуляирование энергии в гибридных автомобилях”, Вісник ХНАДУ, вип.39, 2007.
- 7 K.L. Heitner. “Energy storage requirements and optimization of sustaining power source for hybrid vehicles” In Conference Record, 29th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, volume 3, pages 1387–1392, Washington, DC, USA, 1994.
- 8 <http://sdisle.com/battery/index.html>
- 9 K. Rajashekara. “History of Electric Vehicles in General Motors”. In IEEE Transactions on Industry Applications, volume 30, pages 897–904, July/August 1994.
- 10 L. Shuliakova, I. Trunova. “Analysis of energy storage technologies in a hybrid electric vehicle” KhNADU, Матеріали І Міжнародної наукової конференції студентів та молодих вчених ВТНЗ. Харків:, 2008. – 319 с.
- 11 <http://www.onlybatteries.com>
- 12 <http://www.BatteryUniversity.com>
- 13 <http://www.saftbatteries.com>

- 14 Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. “Накопители энергии” – М.: Энергоатомиздат. 1991. -400 с.
- 15 Овчинников И.Е., “Вентильные электрические двигатели и привод на их основе”. – СПб.: КОРОНА – Век, 2007. – 336 с.
- 16 <http://www.principact.ru>
- 17 Щетина В.А., Морговский Ю.Я, Центер Б.И., Богомазов В.А., “Электромобиль”. – Л.: Машиностроение, 1987. – 253 с.
- 18 Сотсков Б.С., “Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники”. М.: “Высшая школа”, 1970. – 270 с.
- 19 <http://www.dialelectrolux.ru>
- 20 Березуцький В.В., “Основы охорони праці: Навчальний посібник” – Х.: Факт, 2005. – 480 с.
- 21 Навакатікян О.О., Кальниш В.В, Стрюков С.М. “Охорона праці користувачів комп’ютерних відеодисплейних терміналів”. К., 1997. – 4000 с.
- 22 ДНАОП 0.00- 1.31-99. Правила охорони праці при експлуатації ЕОМ.
- 23 ДНАОП 0.00-1.28-97. Правила охраны труда на автомобильном транспорте
- 24 Дзюндзюк Б.В., Іванов В.Г., та ін., “Охорона праці. Збірник задач”. Навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2006. – 244 с.
- 25 Грещак М.Г., Колот В.М., Наливайко А.П., “Економіка підприємства”. – Київ: КНЕУ, 2005. – 608 с.
- 26 Мельник Л.Г., Корінцева О.І., “ Економіка підприємства”. Суми: ВТД “Університетська книга”, 2004. – 412с.
- 27 <http://www.panasonicBatteryPacks.com>