

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ**  
**УНІВЕРСИТЕТ**

**Гнатів Андрій Вікторович**

**Конспект лекцій з дисципліни**

**ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ НА**  
**АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ**

**Харків 2020**

## **Зміст лекцій**

### **Тема 1. Ретроспектива розвитку електричного автомобільного транспорту**

#### **Лекція 1,2 (4 год.)**

1. Особливості розвитку електричного автомобільного транспорту
2. Основні етапи розвитку електромобілів
3. Аналіз даних ретроспективи розвитку електромобілів

#### **Лекція 3 (2 год.)**

1. Переваги та недоліки використання електричного автомобільного транспорту
2. Останні три етапи розвитку електромобілів
3. Аналіз світових тенденцій в царині електромобілів

### **Тема 2 Класифікація електромобілів та гібридів.**

#### **Лекція № 4 (2 год)**

1. Класифікація електромобілів та гібридів
2. Водневий автомобільний транспорт

#### **Лекція № 5 (2 год)**

1. Визначення автобусного транспорту
2. Класифікація автобусного транспорту

#### **Лекція № 6 (2 год)**

1. Електробуси та гібридні автобуси
2. Електробус на паливних елементах
3. Електробус з суперконденсаторним накопичувачем енергії

### **Тема 3 Економічний та екологічний вплив електричних АТЗ**

#### **Лекція № 7 (2 год)**

1. Вплив автомобільного транспорту на навколишнє середовище
2. Викиди електричного автомобіля
3. Ефективність та економічні показники електромобіля
4. Утилізація акумуляторних батарей

#### **Лекція № 8 (2 год)**

1. Електромобілі – майбутнє, яке вже настало
2. Електромобілі та енергозберігаючі технології

#### **Лекція № 9 (2 год)**

1. Енергозберігаючі технології на транспорті
2. Інфраструктурні енергоефективні технології для транспорту
3. Електротехнології на автомобільного транспорту
4. Порівняння різних типів автобусів
5. Модель електробуса на ультраконденсаторах

### **Тема 4 Тяговий електродвигун для електричних АТЗ**

#### **Лекція № 10 (2 год)**

1. Електродвигун-генератор
2. Асинхронні двигуни в електромобілі
3. Синхронні двигуни в електромобілі
4. Мотор-колесо в електромобілі

#### **Лекція № 11 (2 год.)**

1. Асинхронні двигуни із зовнішнім ротором
2. Лінійні асинхронні двигуни

#### **Лекція № 12 (2 год.)**

1. Мотор-колесо.

2. Маточиний асинхронний тяговий двигун із зовнішнім ротором для приводу мотор-колеса.
3. Синхронний тяговий двигун зі збудженням від постійних магнітів.
4. Безконтактний двигун постійного струму.

## **Тема 5 Високовольтна тягова батарея для електричного автотранспорту та систем накопичення електроенергії**

### **Лекція № 13 (2 год.)**

1. Високовольтна тягова акумуляторна батарея
2. Основні параметри для тягової АКБ
3. Типи акумуляторних батарей
4. Твердотельные акумуляторные батареи
5. Суперконденсатори

### **Лекція № 14 (2 год.)**

1. Визначення та класифікація хімічних джерел струму
2. Параметри хдс, режими заряду хдс
3. Використання кислотних та лужних акумуляторних батарей на транспорті

### **Лекція № 15 (2 год.)**

1. Накопичувач енергії для автомобільного транспорту на іоністорах
2. Розрахунок енергетичних показників міського транспорту з блоком накопичення енергії на іоністорах

## **Тема 6. Перетворювачі струму для електричного автотранспорту та систем накопичення електроенергії**

### **Лекція № 16 (2 год.)**

1. Перетворювачі струму для електричного автотранспорту
2. Інвертор DC-DC для електричного автотранспорту
3. Інвертор DC -AC для електричного автотранспорту
4. Випрямляч AC- DC

### **Лекція № 17 (2 год.)**

1. Основи перетворення змінного струму в постійний, основні роз-рахункові співвідношення
2. Діодні перетворювачі однофазного змінного струму, електромаг-нітні процеси, що в них відбуваються
3. Діодні перетворювачі трифазного змінного струму
4. Тиристорні перетворювачі змінного струму в постійний
5. Принципи регулювання для однофазних і трифазних тиристорних випрямлячів
6. Згладжуючі фільтри: активні і пасивні

### **Лекція № 18 (2 год.)**

1. Основи перетворення постійного струму у змінний. класифі-кація напівпровідникових інверторів
2. Структурні схеми напівпровідникових інверторів
3. Транзисторні автономні інвертори
4. Транзисторні ведені інвертори
5. Методи перетворення прямокутної напруги в синусоїдну. резонансні фільтри

## **Тема 7. Сонячні зарядні електростанції для інфраструктури автомобільного електротранспорту**

### **Лекція № 19 (2 год.)**

1. Методи перетворення сонячної енергії в електричну
2. Пряме перетворення сонячної енергії в електричну
3. Непряме перетворення сонячної енергії в електричну
4. Основні типи сонячних електростанцій

### **Лекція № 20 (2 год.)**

1. Автономна сонячна електростанція постійного струму DC

2. Автономна сонячна електростанція змінного струму АС
3. Мережева сонячна електростанція змінного струму АС
4. Гібридна сонячна електростанція змінного струму АС
5. Схеми з виділених груп споживачів

**Лекція № 21 (2 год.)**

1. Проекти та моделі сонячних зарядних станцій для електромобілів
2. Проект сонячної зарядної станції для електромобілів
3. Конструкція сонячної зарядної станції для електромобілів на потужність сонячних елементів 10 кВт

**Тема 8. Зарядні системи для автомобільного електротранспорту**

**Лекція № 22 (2 год.)**

1. Зарядка електромобіля від побутової мережі 220 В
2. Режими та типи зарядки електромобілів
3. Стандарти до зарядних станцій

**Лекція № 23 (2 год.)**

1. Гальмівна система електромобіля
2. Принцип роботи гальмівної системи електромобіля
3. Ефективність рекуперативної системи електромобіля

**Лекція № 24 (2 год.)**

1. Основні дестабілізуючі чинники, що впливають на величину напруги
2. Принципи стабілізації напруги
3. Параметри стабілізаторів напруги
4. Параметричні стабілізатори напруги
5. Принципи побудови компенсаційних стабілізаторів напруги
6. Безупинні компенсаційні стабілізатори напруги
7. Імпульсні компенсаційні стабілізатори напруги

## ЛЕКЦІЯ 1,2 (4 год.)

### ТЕМА 1. Ретроспектива розвитку електричного автомобільного транспорту Частина 1

#### 1. Особливості розвитку електричного автомобільного транспорту

Електричний автомобіль є безумовним і невідворотним майбутнім автомобільної промисловості, при цьому майбутнім найближчим. Багато виробників по всьому світу вкладають значні кошти в розробку електромобілів, адже цьому сприяє перманентне зростання цін на нафтопродукти, необхідність зниження шкідливих викидів під час експлуатації автомобіля, а також розробки пристроїв зберігання енергії та різного роду енергоефективні та енергоощадні технології.

В даний час найбільшими ринками електричних автомобілів є США, Японія та Китай. Трошки відстають від них європейські країни (Франція, Нідерланди, Норвегія, Німеччина, Великобританія). З виробників електрокарів виділяються компанії: Nissan (Leaf), Mitsubishi (i MiEV), Toyota (RAV4EV), Honda (FitEV), Ford (Focus Electric), Tesla (Roadster, Model S, Model X, Model 3), Renault (Fluence Z.E., ZOE, Kangoo Z.E., Twizy), BMW (Active C, i3), Volvo (C30 Electric), Hyundai (Ioniq Electric), General Motors (Chevrolet Bolt), Mahindra (e2o Plus), Volkswagen (e-Golf), Opel (Ampere-e), Mercedes-Benz (B250e), Smart (ForTwo, ForTwo cabrio, ForFour), Citroen (Berlingo Electric), Fiat (500e), а також практично всі фірми автовиробники в Китаї.

Перші електрокари швидко набули популярності завдяки своїй простоті в експлуатації, відсутності запахів і меншому рівню шуму, на відміну від машин, що працюють на бензині.

Такими автомобілями користувалися заможні люди, щоб пересуватися по місту. Вважалося, що основні покупці таких автомобілів є жінки. Таке бачення було продиктоване тим, що електромобілі були чистими, тихими, без вихлопних газів, а найбільш вагомим чинником виступало те, що у них не було заводної рукоятки. Адже завести таким чином авто або розтопити котел в паровому автомобілі було під силу не кожному. Навіть в пресі робили наголос на тому, що електромобілі створені для жінок, наприклад, ілюстрація у вересневому журналі "Vor" 1912 р. "Жіночий автомобіль – електричний" [1-7]. На рис. 1 представлено зображення обгортки журналу 1912 р. та заряд електромобіля Columbia Mark 68 Victoria. Автомобіль випущений компанією Pope Manufacturing в 1906 р., а зарядний пристрій в 1912 р. Вартість цього електромобіля складає 1600 доларів США.

Електромобіль на той час коштував недешево, але він був дуже зручний в експлуатації. Миттєвий запуск двигуна, відсутність коробки передач і зчеплення, практично повна безшумність і небувалий на той час комфорт: внутрішнє електричне освітлення і обігрів ніг. Крім того, покупців приваблювала висока надійність, адже електродвигуни відрізняються від двигунів внутрішнього згорання дуже високою надійністю. На деякі машини навіть спеціально встановлювали декоративні радіатори, щоб зробити їх більш привабливими на ринку серед водіїв-чоловіків [1, 2].



Рис. 1 Електромобіль, як жіноче авто: автоледі заряджає електромобіль Columbia Mark 68 Victoria (зліва) та обкладинка журналу 1912 р.

#### 2. Основні етапи розвитку електромобілів

Проводячи аналіз досліджень щодо розробок та створення електричних транспортних засобів (електромобілів), можна умовно виділити шість етапів їх розвитку [1-4]:

– перший – зародження (1837-1895 рр.);

- другий – інтенсивного розвитку і конкуренції (1896-1930 рр.);
- третій – локального використання (1931-1960 рр.);
- четвертий – широкого проведення дослідно-конструкторських робіт і випуску великої кількості дослідних зразків і малих серій експериментальних електромобілів (1961-1982 рр.);
- п'ятий – певний спад робіт, викликаний різкою зміною кон'юнктури на нафтовому ринку і невдачами в експлуатації дослідних партій через недоліки джерел струму (після 1982-2010 рр.);
- шостий – відродження електромобілів, який пов'язаний з виходом на масовий ринок електрокарів таких відомих фірм, як, Tesla Motors (США), Nissan Motor Company (Японія), BYD AUTO (Китай).

**На першому етапі розвиток** електромобілів відбувалося паралельно з автомобілем. У ці роки автомобілі з ДВЗ ще не були серйозним конкурентом електромобілів. Це було обумовлено тим, що конструкція електромобілів була простіше і вони (як і автомобілі) використовувалися тільки в містах і здійснювали пересування в радіусі 10-15 км. Швидкість таких екіпажів не перевищувала 20 км/год.

Одними з найперших електричних транспортних засобів були екіпажі, створені в 1837 р. американцями Девенпатором і Пейджем, а також шотландцем Робертом Девідсоном. У 1838 р. Б. С. Якобі почав проводити дослід з двигуном, що живиться від батареї гальванічних елементів.

Перші електромобілі являли собою звичайний візок, який був оснащений електродвигуном. В 1828 р., угорець Аньош Дзедлік використовував електромотор у схожій конструкції, рис. 2

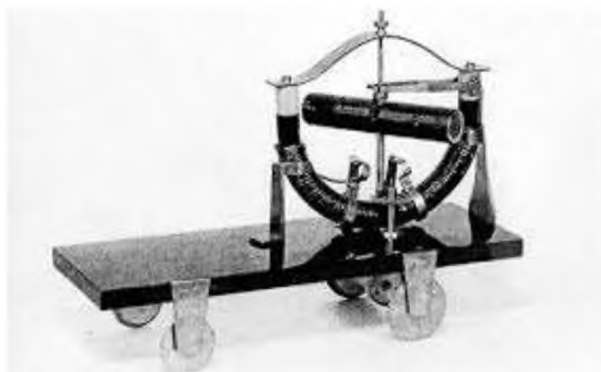


Рисунок 2 – Перший електромобіль - електровізок

В США у 1888 р. був представлений триколісний автомобіль. Десять свинцево-кислотних акумуляторів виробництва Electrical Accumulator Company важили близько 40 кг. Максимальна швидкість конструкції становила вісім миль на годину. Потужність двигуна – 0,5 кінської сили. Це був, скоріше, триколісний електровелосипед (рис. 3).



Рисунок 3 – Одна з перших моделей електромобіля зі свинцевими акумуляторами

Томас Перкер, відповідальний за електрифікацію лондонської підземки, спроектував і побудував свій електромобіль в 1884 р., при цьому він самостійно розробив акумулятор для свого електромобіля, рис. 4.



Рисунок 4 – Електромобіль Томаса Паркера 1884 р.

Другий етап характеризується значною конкуренцією в області створення автомобілів, виробництво яких стало помітно зростати. У цей період електромобілі починають випускатися серійно. Так, в 1897 р на вулицях Лондона з'явилися і успішно працювали електромобілі-таксі, зовні мало відрізнялися від традиційних англійських кебів (рис. 5) [5].



Рисунок 5 – Таксі в 1897 р.

Перше своє авто Ф. Порше зробив у віці 23 років в 1899 р. і це був електромобіль під назвою Egger-Lohner C.2, або «P1», рис. 6 [6]. Ф.Порше використав електродвигун потужність від 3 к.с. до 5 к.с. Номінально в штатному режимі він видавав 3 к.с., але зі спеціально розробленим Порше пристроєм "Перевантаження" потужність сягала 5 к.с. Електромотор приводив задні колеса в рух через 12-ступінчасту коробку передач. Свинцево-кислотні акумулятори забезпечували запас ходу в 80,5 км (максимальна швидкість – 30 км/год.). Вага акумуляторів становила 500,3 кг, при загальній вазі транспорту в 1359,4 кг.



Рисунок 6 – Перший автомобіль Ф. Порше, 1889 р.

У Франції в 1906 р було організовано серійне виробництво легкових електромобілів, що мали запас ходу до 80 км і максимальну швидкість руху до 30 км/год.

У 1899 р. з'явилися перші російські електромобілі, створені інженером І. В. Романовим, а в 1901 р. їм був побудований перший 15-місцевий електроомнібус (рис. 7).



Рисунок 7 – Легковий 2-місний електрокеб і 15-місцевий електроомнібус російського інженера І. Романова

Електромобілі вже на протязі другого етапу свого розвитку почали встановлювати швидкісні рекорди. Так, в 1898 р. електромобіль досяг швидкості 63,3 км/год. Саме на електромобілем вперше в світі був подоланий рубіж швидкості 100 км/год. У 1899 р. електромобіль La Jamais Contente у французькому місті Ашер (поблизу Парижа) досяг швидкості – 105,882 км/год (рис. 8).



Рисунок 8 – Електромобіль La Jamais Contente, 1899 р.

В цей період електромобілі займали значну частку з усіх транспортних засобів, що були в експлуатації. Наприклад, в США до початку ХХ століття з усього числа автомобілів 38 % мали електричні двигуни, 40 % – парові, 22 % – бензинові.

Для першого десятиліття цього періоду характерний підйом в розробці і виробництві електромобілів, а потім деякий спад. У цей період серійне виробництво електромобілів було організовано в Англії, Німеччині, США, Франції, Японії та інших країнах. Так, в 1912 р. в США було випущено 6000 легкових і 4000 вантажних електромобілів. Електромобілі мали, в середньому, запас ходу 50-80 км, а швидкість 20-35 км/год. При цьому слід зауважити, що вантажні електромобілі мали відносно велику вантажопідйомність, яка іноді перевищувала 6 т, а енерговитрати на переміщення були досить малі – 0,054-0,095 кВт-год на 1 т-км повної транспортної роботи електромобіля (рис. 9) [7]. Як приклад (табл. 1) наведені деякі техніко-експлуатаційні характеристики електромобілів розглянутого періоду [3].



Рисунок 9 – Електромобіль, вантажівка-рефрижератор чиказької фірми Walker для транспортування морозива, 1920 р.

Таблиця 1 – Технічні характеристики електромобілів (за період 1916-1930 рр.)

Електромобіль і	Рік випуску	Корисне навантаження, кг	Повна маса з грузом, кг	Батарея		Запас ходу, км	Максимальна швидкість, км/год
				Енергоємність, кВт-год	Вага, кг		
Легковий	1923	244	2234	18,1	780	85	39
	1926	210	1110	9,6	----	100	35
Електробус	1916	1650	5500	24,0	860	70	27
	1924	2500	12000	60,5	3100	62	26
Фургон	1923	579	2700	16,2	800	67	30
Грузовий	1923	5972	12061	45,0	1600	55	22
	1923	2000	4750	20,7	1100	----	----
	1924	1470	4554	26,9	1000	68	26,5
	1924	6468	13835	52,5	2150	47	18
	1926	1030	3645	17,2	900	75	20,7
	1926	4070	9100	28,4	1500	58,7	17
	1929	3500	8760	28,4	1560	60	26

У 1918-1928 рр. спрощені конструкції електромобілів у вигляді електровізків знайшли широке застосування в якості технологічного транспорту на машинобудівних підприємствах, рис. 10.



Рисунок 10 – Одна з конструкцій електромобіля у вигляді електровізка

В перші десятиліття ХХ століття підвищилася конкурентоспроможність автомобілів з ДВЗ по відношенню до електромобіля. Це пояснюється подальшим вдосконаленням конструкції поршневих двигунів, що забезпечило автомобілів швидкості руху, що перевищують 80 км/год, а запас ходу до 300 км. Це дозволило використовувати автомобіль за межами міста [4].

**Третій етап** характерний тим, що вже на початку 30-х років ХХ століття виробництво електромобілів різко скоротилося. Лише в окремих країнах, таких як Великобританія, Німеччина і США, тривав їх випуск невеликими партіями. Електромобілі використовувалися на перевезеннях, де були потрібні невеликі пробіги і невисокі швидкості руху. У 1939 р. кількість електромобілів в Німеччині становила понад 9 тис., а до 1944 р. досягло 20 тис. одиниць. Останнє пояснюється наміром уряду Німеччини зменшити залежність від імпортного нафтового палива.

На третьому етапі також спостерігається зростання виробництва електромобілів в Англії. Так, з 1930 по 1960 рр. їх кількість зросла в 15 разів і досягла 26 тис. одиниць. При цьому електромобілі ефективно використовувалися в процесі централізованої доставки додому різних товарів з торговельної мережі, перевезення посилок і пошти. Там, де не потрібні великі середньодобові пробіги і високі швидкості руху транспортних засобів.

Роботи по розробці електромобілів велися також і в радянському союзі. Так, в 1935 р. на базі автомобіля ГАЗ-А був побудований перший радянський електромобіль. В цей же час в лабораторії електричної тяги Московського енергетичного інституту під керівництвом проф. В. Е. Резенфорда і інж. Ю. М. Галкіна був створений двотонний електромобіль на базі автомобіля ЗІС-5.

У 1948 р. у Науково-дослідному автомобільному і автотранспортному інституті (НАМІ) були розроблені і виготовлені електромобілі вантажопідйомністю 0,5 т і 1,5 т, чотири зразки яких використовувалися для перевезення пошти в Москві, рис. 11. Потім 10 дослідних зразків цих електромобілів, виготовлених Львівським автобусним заводом, експлуатувалися в період з 1952 до 1958 рр. в Ленінграді (Санкт-Петербурзі); вони також в основному використовувалися для перевезення поштових вантажів. Деякі дані про техніко-експлуатаційних параметрах цих електромобілів наведені в табл. 2 [3, 8].



Рисунок 11 – Загальний вид електромобілів НАМІ ЛАЗ вантажопідйомністю 0,5 т (ліворуч) і 1,5 т (праворуч)

У 1957 р. в НАМІ були розроблені нові зразки електромобілів тієї ж вантажопідйомності, а через два роки НАМІ спільно з Ульяновським автозаводом імені В.І. Леніна був виготовлений

дослідний зразок електромобіля вантажопідйомністю 0,8 т на базі автомобіля УАЗ-450. В цей же період був створений перший радянський електробус на базі тролейбуса СВАРЗ місткістю 70-80 чол., рис. 12 [9].

Таблиця 2 – Техніко-експлуатаційні характеристики електромобілів НАМІ

Параметр	НАМІ-750	НАМІ-751
Вантажопідйомність, кг.	500	1500
Маса в спорядженому стані, кг	1765	2640
Маса тягової акумуляторної батареї, кг.	685	1100
Запас ходу, км.	55	70
Максимальний середній експлуатаційний запас ходу, км.	45-50	55-60
Максимальна швидкість руху, км.	33	30



Рисунок 12 – Електробус, побудований для аеропорту Внуково на базі тролейбуса СВАРЗ

Найперша модель Ульяновського електромобіля УАЗ-450ЕМ була розроблена в 1959 році на базі серійного УАЗ-450 і УАЗ-450А. Призначалася вона для обслуговування аеродромів. На електромобілях застосовувалися тягові акумуляторні батареї, розбиті на 2 секції, встановлені під підлогою кузова по обох бортах у спеціальних ящиках, рис. 13 [10]. Отже, в період з 1930 по 1960 рр. в Радянському Союзі регулярно проводилися експериментальні дослідження з розробки та використання електромобілів в народному господарстві країни, хоча широкого застосування вони не отримали.



Рисунок 13 – Перша модель електромобіля УАЗ-450ЕМ

### 3. Аналіз даних ретроспективи розвитку електромобілів

Прототипи сучасних електромобілів почали конструювати ще до винаходу двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ). Всього лише через кілька років після відкриття Майклом Фарадеєм в 1831 році явища електромагнітної індукції з'явилися електродвигуни, придатні для використання в електромобілях. В кінці ХІХ і початку ХХ століття електромобіль був одним з основних засобів пересування, успішно конкуруючи спочатку з каретами або возами на паровій тязі, а потім з першими бензиновими автомобілями. Саме на електромобілі вперше в світі був подоланий рубіж швидкості 100 км/год.

Таких шалений успіх перших електромобілів був обумовлений тими перевагами, якими вони володіли у порівнянні з іншими засобами пересування. Це простота конструкції, зручність використання, безшумність роботи, відсутність бруду (мастил, сторонніх запахів), висока надійність тощо. Наявність всіх цих переваг забезпечило стрімкий розвиток електромобілебудування на перших своїх етапах. Але поряд з наявними перевагами перші електромобілі мали і свої недоліки. Основні з яких це малий запас ходу та висока ціна. Основним чинником в утворенні ціни був досить кошковий блок акумуляторних батарей. Тому, розвиток технологій пов'язаних з ДВЗ, які використовувалися на автомобілях призвів до того, що таке авто стало значно привабливішим. А масове виробництво ДВЗ забезпечило досить низьку ціну автомобіля у порівнянні з електромобілем. Саме це й обумовило різке скорочення виробництва електромобілів на початку 30-х років ХХ століття.

### Література

1. Електромобиль. Воспоминания о будущем. // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [http://www.startup.org.ua/2016/10/blog-post\\_19.html](http://www.startup.org.ua/2016/10/blog-post_19.html).
2. Українські електромобілі: 70 років історії // Матеріали сайту – 2014. – Режим доступу: <http://ecotown.com.ua/news/Ukrayinski-elektromobili-70-rokiv-istoriyi/>.
3. Этапы развития электромобилей и их конструкции // Матеріали сайту – 2010. – Режим доступу: <http://www.electro-machines.ru/content/etapy-razvitiya-elektromobilei>.
4. В.А. Щетинина електромобиль. Техника и экономика / В.А. Щетинина, Ю.Я. Морговский, Б.И. Центер, В.А.Богомазов. – Л. : Машиностроение, 1987. – 253 с.
5. Электротакси: три года испытаний // Матеріали сайту – 2013. – Режим доступу: <http://surfingbird.ru/surf/dWsx4a34#.WAo-VUuHPHw>.
6. Первый электромобиль Фердинанда Порше выставлен в Музее // Матеріали сайту – 2013. – Режим доступу: <https://360carmuseum.com/ru/news/article/24>.
7. Электромобили. История и эволюция машин на батареях // Матеріали сайту – 2013. – Режим доступу: [http://www.silver.ru/programms/test\\_dravv\\_onlayn/editions-of-the-program/materials-ElektromobiliIstoriyaievoluyutsiyamashinnabatareyakh/](http://www.silver.ru/programms/test_dravv_onlayn/editions-of-the-program/materials-ElektromobiliIstoriyaievoluyutsiyamashinnabatareyakh/)
8. Б.Л. Бусыгин Электромобили / Б.Л. Бусыгин. – М.:МОСКВА, 1979. – 273 с.
9. Забытые страницы истории московского троллейбуса // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://nmm.me/blogs/kissaveli/za-bytye-stranicy-isto-rii-mos-kov-skogo-trolley-busa/>
10. Электромобили УАЗ // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://www.uaz.ru/company/75/elektromobili-uaz>.

## ЛЕКЦІЯ 3 (2 год.)

### ТЕМА 1. Ретроспектива розвитку електричного автомобільного транспорту Частина 2

#### 1. Переваги та недоліки використання електричного автомобільного транспорту

Під терміном електромобіль слід розуміти автомобіль, що наводиться в рух одним або декількома електродвигунами з живленням від акумуляторів, ємнісних накопичувачів енергії або паливних елементів. Перевагами електромобілів є: відсутність шкідливих вихлопів; простота конструкції і управління, висока надійність і довговічність; можливість заряджання від побутової електричної мережі. Також експерти відзначають, що масове використання електромобілів сприятиме у вирішенні проблеми енергетичного перенавантаження у денний час та нівелюванню надлишку електричної енергії у нічний час. А саме, цю проблему можна частково вирішити за рахунок заряджання акумуляторів в нічний час. Адже не використовується вночі електроенергія через відсутність нічного споживання, в енергосистемі України складає 30 %. Цю електроенергію просто нікуди дівати, у атомних станцій (63,5 % від загального виробітку) у гідроелектростанції (18 % від загального виробітку). Існуючі перепади в споживанні є реальною техногенною загрозою будь-якої енергосистеми [1].

Доволі часто проти електромобілів висловлюють такий аргумент, як можлива нестача електроенергії для їх заряду (при їх масовому використанні). Але доволі простий аналіз показує, що нові генеруючі потужності не знадобляться [2]. Наприклад, в США, за підрахунками незалежного агентства EIA, якщо весь автопарк з 250 млн машин сьогодні перевести на електротягу, то вночі (в період так званого провалу навантаження) енергії вистачить, щоб зарядити 79 % транспортних засобів. Денний спад енергоспоживання теж існує: сумарно «вільної енергії» вистачить на ті ж 79 % легковиків, однак важливо, щоб машини приїжджали на зарядку не коли заманеться, а в потрібні години. Це питання вирішується мобільним додатком, який підкаже оптимальний час для «заправки» електрикою. Такі сервіси вже доступні в Україні [3].

В Європі - інша проблема. У Данії, Норвегії та багатьох інших країнах, де розвинена альтернативна енергетика, проблемою є зовсім не дефіцит, а надлишок її генерації. Отже істотну частину європейського автопарку вже зараз вигідно перевести на електротягу. Більш того, через впровадження енергозберігаючих технологій споживання електрики в усьому світі постійно падає, а потужності залишаються – в майбутньому ці «вільні кіловати» і будуть заряджати батареї електромобілів [1–3].

На цей час практично всі відомі автовиробники розробляють свій власний або приймають участь у спільній розробці електромобіля, їх складових елементів чи систем заряду блоків накопичення енергії. Особливого прогресу в цьому напрямку досягли автомобільні підприємства з Китаю. Де практично кожен автовиробник має свій власний електромобіль або його прототип. Адже, китайський уряд збирається вже з 2018 року зобов'язати всіх автовиробників, що працюють в Китаї, випускати як мінімум вісім відсотків електромобілів – або платити штрафи [4].

Отже, на цей час вже не стоїть питання буде чи не буде мати майбутнє електромобіль, як транспортний засіб масового виробництва. Відповідь на нього однозначна та всім очевидна – електромобіль вже є масовим транспортним засобом.

Розвиток електрокарів в конкретній країні напряму залежить від державної політики цієї країни стосовно екологічного виду транспорту. Наприклад, в Китаї, де сама державна політика стимулює розвиток електромобілів, а його ринок нараховує більше 60 моделей, з них 13 були продані в кількості більше 10 000 в 2016 р. Для порівняння, в США такими показниками можуть похвалитися лише п'ять моделей: Tesla Model S, Tesla Model X, Chevy Volt, Ford Fusion Energi і Nissan LEAF [5].

З кожним роком спостерігається постійне зростання кількості електромобілів майже у всіх країнах Світу. І Україна в цьому займає одне з перших місць. За підсумками 2016 р. кількість автомобілів на електротязі збільшилася в 4 рази у порівнянні з 2015 р. Станом на 31 грудня 2016 р. українці зареєстрували 2593 «зелених» машин: 1709 автомобілів на повністю електричній тязі і 884 - з гібридною силовою установкою [6]. На кінець 2016 р. кількість електромобілів у Світі вже нараховувала більше 2 млн [7]. Отже, цілком природньо виникає бажання розуміти всі етапи розвитку та становлення електромобілів, бо ці знання дають всебічну уяву, щодо їх можливостей, призначення та особливостей конструкції.

В публікаціях [8–11] приведено досить детальний аналіз перших етапів розвитку електромобілебудування. Тому, не зупиняючись на основних його досягненнях, перейдемо до аналізу останніх трьох етапів.

## 2. Останні три етапи розвитку електромобілів

**Четвертий етап**, починаючи з середини 60-х років XX століття, характеризується новим підвищеним інтересом до електромобілів у багатьох промислово розвинених країнах.

Особливо інтенсивно почали вони розроблятися в США, Японії, Німеччині та Англії, що обумовлено головним чином загостренням енергетичної та екологічної проблем. В кінці 60-х і початку 70-х років XX століття утворилася енергетична криза в багатьох капіталістичних країнах, що свідчить про те, що ресурси нафтових палив для автомобілів з ДВЗ є обмеженими.

З іншого боку, велика насиченість міст автомобільним транспортом викликала різке підвищення рівня забруднення навколишнього середовища відпрацьованими газами. З огляду на те, що електромобілям не потрібно рідке паливо і вони практично не створюють шумового забруднення і токсичних викидів на магістралях і вулицях міст, вчені та інженери зробили спробу з їх допомогою сприяти вирішенню екологічної проблеми.

У зв'язку з цим в період з 1966 по 1971 рр. було розроблено найбільшу кількість дослідних зразків електромобілів, хоча подальшого помітного розвитку і застосування вони, як правило, не знаходили. Нерідко такі розробки носили рекламний характер.

**На п'ятому етапі** розвитку електромобілів спостерігався спад їх виробництва, який був викликаний різкою зміною кон'юнктури на нафтовому ринку і невдачами в експлуатації дослідних партій через недоліки акумуляторних батарей (АКБ). Отже, наведемо тільки пару прикладів виробництва електромобілів в цей період, які найбільш яскраво його характеризують.

В Радянському союзі в період з 1980-1985 рр. було випущено 65 одиниць електромобілів УАЗ-3801, рис. 1 [12]. Корисна вантажопідйомність до 800 кг. Маса акумуляторів 680 кг. Повна маса 2750 кг. Однієї зарядки вистачало на 48-50 км пробігу, а бортовий зарядний пристрій всього за годину заряджає АКБ майже на 70%. Після установки системи рекуперації (при гальмуванні заряджалась батарея) пробіг виріс до 70-75 км. Для зими встановили бензиновий опалювач від автомобіля ЗАЗ. У жовтні 1978 р. головний конструктор Кузнецов демонстрував розробку на всесвітній виставці електромобілів в Філадельфії і це був єдиний електромобіль, який працював на змінному струмі. Зараз, перевага віддається саме змінному струмі.



Рисунок 1 – Електромобіль УАЗ-3801

У 1976 році на Єлгавському автозаводі виготовлено партію мікроелектробусів РАФ-2203 [13]. На ці електромобілі встановлювали двигуни потужністю 23 кВт. РАФ-2203 вмещав 10 осіб (включаючи водія) і розвивав швидкість до 60 км/год. АКБ (їх загальна маса 630 кг) забезпечували запас ходу близько 70 км. Пізніше під час олімпіади 1980 р. в Москві деякі суддівські автомобілі були перероблені в електромобілі оснащені сонячною панеллю, рис. 2. Також проводились роботи з моделлю РАФ-2210 в якості електромобіля. В 1982 р. 3 таких машини доставлені в Москву в якості таксі, рис 3.



Рисунок 2 – Мікроелектробус РАФ-2203



Рисунок 3 – Електромобіль РАФ-2210

Основною причиною застою в розвитку сучасних конструкцій електромобілів стало відсутність нових джерел струму, що володіють високою енергоємністю при невеликій їх вартості.

Найбільшої уваги в цьому періоді заслуговує електромобіль EV1 (Electrical Vehicle 1) – авто компанії General Motors. Цей електромобіль випускався з 1997 р., в другому поколінні – з 1999 р. Він був доступний тільки в Каліфорнії і Арізоні і тільки на умовах лізингу [14], рис. 4.

У першому поколінні були встановлені звичайні свинцево-кислотні акумулятори. Було вироблено 660 авто. На другому поколінні EV-1 встановлювалися нікель-метал-гидридні акумулятори. Було вироблено 457 авто.



Рисунок 4 – Електромобіль EV1

Технічні характеристики електрокара EV1: запас ходу на свинцево-кислотних АКБ складав від 90 до 120 км, на нікель-металгідридних АКБ – до 240 км; EV1 розганяється з місця до 96 км/год за 9 с і розвивав швидкість в 129 км/год (примусово обмежену на цій позначці); вага автомобіля 1400 кг; батарея NiMH "Nickel Metal Hydride" важила 416 кг, енергоємність 18,7 кВт·год; двигун: трифазний електромотор змінного струму потужністю 102 кВт (138 л.с.); замість коробки передач – двоступеневий редуктор; кузов – просторова зварна несуча конструкція з алюмінієвого сплаву, вагою 132 кг.

Всього було вироблено 1117 шт. EV-1. У 2003 р. програма була закрита. Електромобілі вилучені у користувачів і знищені. У музеях залишилося лише 2 електромобіля.

**Шостий етап** розвитку електромобілів можна умовно назвати, як відродження. Умовний термін його початку – після 2010 р. Перед його початком, в 2003 р. засновано одну з найвідоміших сучасних компаній Tesla Motors (США). Це американська автомобільна компанія з Кремнієвої

долини, орієнтована на виробництво електромобілів. Названа на честь всесвітньо відомого електротехніка і фізика Ніколи Тесли. В 2006 р. компанія представила свій перший спортивний електромобіль Tesla Roadster [15 – 17].

Tesla Roadster має 3-фазним 4-полюсним асинхронним двигуном змінного струму. Управління – частотне. Реалізовано повітряне охолодження. Силова установка здатна створювати потужність порядку 248 к.с. (185 кВт) і крутний момент в 270 Н·м. Передача крутного моменту відбувається через одноступінчатий редуктор (BorgWarner) на задній міст. За 3,9 с таке авто може розігнатися майже до 100 км/год. Виробниками встановлено обмеження максимальної швидкості – 201 км/год. При цьому запас ходу становить 300 км.

Модель, яка стала другою за рахунком від Tesla Motors, стала Tesla Model S, рис. 5. Це авто преміум класу у вигляді 5-дверного ліфтбека. Попит на Tesla Model S був величезним в самій Каліфорнії і в Норвегії відразу ж після презентації. Виробництво S-моделі було налагоджено у Каліфорнії і Голландії. Дана модель завоювала чимало нагород, серед яких «Автомобіль року 2013» (за версією журналу Motor Trend, США).



Рисунок 5 – Електромобілі Tesla Model X (ліворуч) та Tesla Model S (праворуч)

Перший реліз Model S пройшов на виставці у Франкфурті в 2009 р., Зовнішній вигляд S-моделі мав кодову назву «White star». У 2012 р. авто надійшов у продаж. Починаючи з 2012 р., по 2016 р. по всьому світу продано близько 50 тис. одиниць Tesla Model S. Попит на цей електромобіль був настільки високим, що з конвеєра сходило близько 1000 машин на тиждень. І це не дивно, бо починаючи з 2013 р. Tesla Model S вважається одним з найбезпечніших автомобілів. Національне агентство по безпеці дорожнього руху в США признало цей автомобіль самим безпечним на теренах США [18]. Технічні характеристики Model S: розгін з 0 до 100 км/год: 2,28...4,4 с (в залежності від моделі); максимальна швидкість: 201-250 км/год (в залежності від моделі); запас ходу – 506 км (по американським нормам) та 613км (по європейським нормам); час повного заряду акумулятора: 35 хв (через SuperCharger).

У лютому 2012 р. компанія анонсувала новинку – модель Tesla Model X, яка з'явилася на ринку вже в 2016 р., а в середині 2014 р. оголосила щодо підготовки до виходу бюджетної версії – автомобіля Tesla Model 3, базова версія якого складає \$35000.

Тільки но з'явившись електромобіль Tesla Model X вже зміг отримати престижну європейську премію «Золотий руль 2016» в номінації найкращій SUB [19]. Отже, це свідчить лише про одне – за електромобілями майбутнє.

Ще один електромобіль, який не можливо пропустити по за увагою – це Nissan Leaf. Бо цей електромобіль, на цей час, є найбільш поширеним у всьому світі в сегменті електрокарів. Nissan Leaf – електромобіль японського концерну Nissan, що серійно випускається з весни 2010 р., рис. 6 [20]. Світова прем'єра відбулася на міжнародному токійському автосалоні в 2009 р.



Рисунок 6 – Електромобіль Nissan Leaf

В кінці листопада 2010 р. Nissan Leaf був оголошений першим серед електромобілів переможцем конкурсу Європейський автомобіль 2011 р. (англ. European Car of the Year) [21]. У наприкінці квітня 2011 р. Nissan Leaf був також оголошений першим переможцем конкурсу Всесвітній автомобіль 2011 р. (англ. World Car of the Year) [22].

Leaf – по-справжньому перший масовий електромобіль, продажі якого почалися по всій земній кулі. Електродвигун електромобіля розвиває 80 кВт і 280 Нм. Живлення двигуна сповнюється від літій-іонної батареї ємністю 24 кВт·год., вагою 300 кг, що розташована під підлогою салону та визначає низький центр ваги і, як наслідок, непогану керованість. Електромобіль Leaf має два гнізда для зарядки – один для зарядки від однофазної мережі (звичайна розетка), другий – спеціальний роз'єм для зарядки від трифазної мережі. Від електричної мережі 220 В акумулятор повністю заряджається за 8 годин. Повністю зарядженої батареї вистачає на 160 км [23].

Також слід ще зупинитися на одній з найбільш відомих компаній з Китаю, яка займається виробництвом електротранспорту – це BYD AUTO [24].

Компанія BYD була заснована в 1995 р. як виробник акумуляторних батарей. Вона практикується на IT-розробках, автомашинах і альтернативних видах енергії. Зараз є світовим лідером з виробництва акумуляторів і систем енергозбереження. Виробничі потужності знаходяться в Китаї, країнах Європи та Японії.

З 2003 р., спільно з випуском акумуляторів, BYD – єдиний китайська виробник автомобілів, який експонує власні авто на Женевському автомобільному салоні і має консульства на всіх континентах. З 2008 р. фірма серійно виготовляє і реалізує гібридні авто, а з 2009 р. розпочато створення електромобілів, а вже з 2010 розпочато спільний проект з виробництва електромобілів з Daimler AG. У 2010 р. фірмою було зроблено понад півмільйона авто, і BYD зайняла 1 місце в списку найбільш технологічних компаній світу (за версією Business Week), випередивши таких гігантів як Apple і Google, і 2 місце з числа автомобільних компаній, випередивши Ford, Volkswagen і BMW.

Прототип моделі BYD E6 був представлений на автосалоні в Пекіні в 2008 р., рис. 7. У січні 2010 р. в Детройті дебютувала передсерійна версія авто, а роком пізніше – готова до масового виробництва. Електромобіль BYD E6 оснащений електромотором потужністю 101 к.с. (75 кВт, 450 Нм), який живиться від залізо-фосфатного акумулятора власної розробки. Без підзарядки електромобіль здатний проїхати в міських умовах до 300 км, розганяючись до 100 км/год за 12 с, а максимальна швидкість E6 може скласти 140 км/год [25, 26].



Рис. 7. Електромобіль BYD E6

### 3. Аналіз світових тенденцій в царині електромобілів

Ринок електромобілів тільки починає свій розвиток, але вже на цей час досить наочно представляється те, що в недалекому майбутньому (років 5 – 10) в світі буде спостерігатися бум в електромобілебудуванні. За прогнозами фахівців вже в 2020 – 2022 рр. електромобілі зрівняються в ціні з автомобілями з ДВЗ такого ж класу. На цей час, головними недоліками електромобілів є автономний запас ходу та сам час зарядки. Але ці питання знаходять своє вирішення, більше того, ряд автовиробників вже запропонували свої рішення стосовно автономності ходу електромобіля. Так, наприклад компанія Tesla Motors активно проводить тестування свого електромобіля з запасом ходу близько 1000 км. А після 2020 р. фахівці з Tesla Motors прогнозують появу автомобіля з пробігом 1167 км [27].

Інший приклад, у 2015 р. компанія nanoFlowcell AG представила електрокара Quant F та Quantino, рис. 8 [28]. Особливістю представлених електромобілів є система рідких проточних батарей, електроенергія в яких виробляється за рахунок проходження двох окремо «заряджених» рідин через спеціальну комірку. Запас ходу від одної зарядки складає більше 1000 км.



Рис. 8. Електромобілі nanoFlowcell Quant F (зліва) та Quantino (зправа)

Найбільш вагомий внесок в подальше «гучне» майбутнє електромобілів зробили два американські виробники автомобілів – Tesla Motors та General Motors. Ці фірми представили на ринок електромобілів свої авто на електричній тязі в середньому класі легкових автомобілів з досить пристойними характеристиками та прийнятною ціною. Це Tesla Model 3 та Chevrolet Bolt EV, рис. 9 [29].



Рис. 9. Електромобілі Tesla Model 3 (ліворуч) та Chevrolet Bolt EV (праворуч)

Ці електромобілі вартістю менше \$ 40000, які будуть долати відстань більше 300 км на одному заряді, з'являться вже до кінця 2017 р. На Tesla Model 3 ще до початку офіційних продажів вже отримано більш ніж 400 тис. предзамовлень. Так, для порівняння, самий розповсюджений електромобіль Nissan Leaf нарахував з 2010 р. близько 275 тис. проданих авто [30]. Chevrolet Bolt EV – машина General Motors стала першим електромобілем, яка завоювала нагороду (номінація «North American Car of the Year») (Краще авто 2017 р. в Північній Америці) [31]. Очікується, що саме ці два електромобілі будуть задавати тренд на найближче майбутнє в світі «зеленого» автотранспорту на електричній тязі, призначеного для масового споживача.

Отже, можна впевнено стверджувати, що за електромобілями майбутнє, адже ці автомобілі є екологічним видом транспорту, що здобули популярність у світі. Так, керівництво розвинених країн у різний спосіб заохочує громадян купувати їх. Тобто, у всьому світі для покупців автомобілів на електричній тязі створюються різноманітні преференції: податкові пільги, компенсації вартості авто, безкоштовні паркінги тощо. Наприклад, у Китаї покупець отримує компенсацію в розмірі близько 35% вартості авто, а в США така «знижка» становить 25%. У деяких країнах – Португалії, Іспанії, Франції, Ірландії та інших – уряд виплачує субсидію в розмірі від 5 000 до 7000 євро (залежно від моделі) кожному покупцеві. В таких країнах, як Великобританія, Данія, Німеччина прямих субсидій на придбання електромобілів немає, але всіх покупців звільняють від сплати транспортного податку на певних термін (до 5 років) або від збору при реєстрації. Також в США представлено на розгляд законопроект, по якому власникам електромобілів будуть платити по \$250 на місяць для покриття розходів на зарядку машини. В Китаї реалізується цілеспрямована державна програма, щодо заохочення переходу на автотранспорт, який не шкодить навколишньому середовищу [32].

Світові тенденції, щодо розвитку електромобілів є вже незворотними. Так в Європі планують обладнати зарядками кожен новий або відремонтований будинок. Проект цієї директиви ЄС, набуде чинності до 2019 р. Крім того, до 2023 р. 10 % паркувальних місць в новобудовах ЄС повинні бути обладнані станціями зарядки. [33]. У Німеччині виступають за заборону реєстрації нових автомобілів з ДВЗ з 2030 р. Німеччина також виступає за те, щоб це рішення діяло на всій території ЄС. Також уряд Німеччині з липня 2016 разом з автобудівниками виплачує кожному покупцеві премію: €4000 за чистий електромобіль і €3000 за гібрид. Програма субсидування розрахована як мінімум на 300000 автомобілів [4]. Національний план з розвитку транспорту Норвегії передбачає припинення з 2025 р. реєстрацію нових автомобілів з ДВЗ. На даний момент в Норвегії частка електрокарів близько 28%.

На останок, для більшої наочності неминучого процесу «електромобілізації», слід привести дані аналітики. Так, фахівці з аналітичного агентства **Bloomberg** прогнозують, що споживання бензину і дизеля автомобілями зменшиться на 75% до 2030 р.. Електрокари складуть близько 65% від загального числа транспортних засобів в Лондоні і Сінгапурі вже через 15 років. Вартість літій-іонних АКБ в 2015 р. знизилася на 65% – до \$ 350 за кВт·год. і, як очікується, до 2025 р. знизиться до \$ 100 за кВт·год [34].

### Література

1. Ночное потребление // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://electroauto.com.ua/nochnoe-potreblenie.html>.
2. В Европе запретят двигатели внутреннего сгорания: все подробности // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [http://autonews.com.ua/v-evrope-zapretyat-dvigateli-vnutrennego-sgoraniya-vse-podrobnosti/?utm\\_placement=0](http://autonews.com.ua/v-evrope-zapretyat-dvigateli-vnutrennego-sgoraniya-vse-podrobnosti/?utm_placement=0).
3. Мобільний додаток // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://tesla-club.com.ua/app/>.
4. Рынок электромобилей: Китай лидирует // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://newsyou.info/rynok-elektromobilej-kitaj-lidiruet>.
5. Топ-3 самых популярных электрокаров в Китае // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://ecotechnica.com.ua/transport/1891-top-3-samykh-populyarnykh-elektrokarov-v-kitae.html>.
6. За год число электромобилей в Украине увеличилось в 4 раза и составило 2600 единиц // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://ecotechnica.com.ua/transport/1968-za-god-chislo-elektromobilej-v-ukraine-uvlechilos-v-4-raza-i-sostavilo-2600-edinits.html>.
7. В мире электромобилей станет больше 2 млн к концу 2016 // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://ecotechnica.com.ua/transport/1167-v-mire-elektromobilej-stanet-bolshe-2-mln-k-kontsu-2016.html>.
8. Электромобиль. Воспоминания о будущем. // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [http://www.startup.org.ua/2016/10/blog-post\\_19.html](http://www.startup.org.ua/2016/10/blog-post_19.html).
9. Электромобили. История и эволюция машин на батареях // Матеріали сайту – 2013. – Режим доступу: [http://www.silver.ru/programms/test\\_dravv\\_onlayn/editions-of-the-program/materials-Elektromobilistoriyaevolyutsiyamashinnabatareyakh/](http://www.silver.ru/programms/test_dravv_onlayn/editions-of-the-program/materials-Elektromobilistoriyaevolyutsiyamashinnabatareyakh/)
10. Бусыгин Б.Л. Электромобили / Б.Л. Бусыгин. – М.: 1979. – 273 с.
11. Этапы развития электромобилей и их конструкции // Матеріали сайту – 2010. – Режим доступу: <http://www.electro-machines.ru/content/etapy-razvitiya-elektromobilei>.
12. Электромобиль УАЗ-3801 с аккумуляторной энергоустановкой // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [http://www.uazbuka.ru/models/uaz-3801\\_electro.html](http://www.uazbuka.ru/models/uaz-3801_electro.html).
13. Советские электромобили // Матеріали сайту – 2013. – Режим доступу: <http://back-in-ussr.com/2013/12/sovetskie-elektromobili.html>
14. General Motors EV1 // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [https://ru.wikipedia.org/wiki/General\\_Motors\\_EV1](https://ru.wikipedia.org/wiki/General_Motors_EV1).
15. Tesla Motors // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_Motors](https://ru.wikipedia.org/wiki/Tesla_Motors).
16. Революционер индустрии. История компании Tesla // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <https://www iPhones.ru/iNotes/436681>.
17. История развития Tesla Motors // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://autotesla.ru/auto-tesla/istoriya-razvitiya-tesla-motors.html>.
18. Водитель Tesla Model S на высокой скорости врезался в фуру и выжил // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://avtopolygon.info/news/voditel-tesla-model-s-na-vysokoi-skorosti-vrezalsya-v-furu-i-vyzhil-foto.html>.
19. Электрокроссовер Tesla Model X получил «Золотой руль» // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://ecotechnica.com.ua/transport/1679-elektrokrossover-tesla-model-x-poluchil-zolotoj-rul.html>.
20. Nissan LEAF // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Nissan\\_LEAF](https://ru.wikipedia.org/wiki/Nissan_LEAF).
21. Электричество победило // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [http://www.vedomosti.ru/newspaper/articles/2010/11/30/elektrichestvo\\_pobedilo](http://www.vedomosti.ru/newspaper/articles/2010/11/30/elektrichestvo_pobedilo).
22. Nissan Leaf: 2011 World Car of The Year // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [http://money.cnn.com/2011/04/21/autos/leaf\\_world\\_car\\_of\\_the\\_year/index.htm](http://money.cnn.com/2011/04/21/autos/leaf_world_car_of_the_year/index.htm).
23. Nissan Leaf // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://ecoautoinfo.com/Nissan/Nissan-Leaf.html>.

24. История BYD // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [http://www.auto-infosite.ru/info\\_istoriya-byd.html](http://www.auto-infosite.ru/info_istoriya-byd.html).
25. История марки BYD // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://www.autodealer.ua/news/istorija-marki-byd/>.
26. Автомобили BYD// Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://www.amkauto.com.ua/ru/auto/byd.html>.
27. Запас хода электрокаров Tesla перевалит за 1000 км // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://autogeek.com.ua/zapas-hoda-elektrokarov-tesla-uvelichitsya-za-1000-km/>.
28. Автомобили на "жидком" электричестве // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <https://www.drive2.ru/b/2849445/>.
29. Tesla Model 3 проти Chevrolet Bolt: 5 відмінностей, які потрібно знати для правильного вибору // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://ecotechnica.com.ua/stati/1937-tesla-model-3-protiv-chevrolet-bolt-5-otlichij-kotorye-nuzhno-znat-dlya-pravilnogo-vybora.html>.
30. В кафе Nissan посетители расплачиваются электроэнергией // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://ecotechnica.com.ua/energy/1843-v-kafe-nissan-posetiteli-rasplachivayutsya-elektroenergij-video.html>.
31. Электромобиль Chevy Bolt стал лучшим автомобилем года в Северной Америке // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://ecotechnica.com.ua/transport/1931-elektromobil-chevy-bolt-stal-luchshim-avtomobilem-goda-v-severnoj-amerike.html>.
32. Десять ознак початку буму електромобілів // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://www.dw.com/uk/десять-ознак-початку-буму-електромобілів/a-36114453>.
33. Кожен новий будинок у Європі планують обладнати зарядками для електромобілів // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://ecotown.com.ua/news/Kozhen-novyuy-budynok-u-YEvropi-planuyut-obladnaty-zaryadkami-dlya-elektromobiliv/>.
34. Електромобілі наїхали на нафту, дослідження Bloomberg// Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://spokki.net/elektromobili-nayihaly-na-naftu-doslidzhennya-bloomberg/>.

## Лекція № 4 (2 год)

### Тема 2 Класифікація електромобілів та гібридів.

#### 1. Класифікація електромобілів та гібридів

Розглянемо класифікацію електромобілів. Нижче приведено аббревіатуру яку будемо використовувати.

BEV - Battery Electric Vehicle

HEV - Hybrid Electric Vehicle; full hybrid vehicle

FCBEV - Fuel Cell Battery Electric Vehicle; battery-powered vehicle with fuel cell

PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle; vehicle with full hybrid drive and external charging facility

RXBEV - Range Extender Battery Electric Vehicle; battery-powered vehicle with additional generator drive to increase range (range extender)

Під терміном «електромобілі» слід мати на увазі всі автомобілі, які приводяться в рух за допомогою електричної енергії. До них відносяться як автомобілі, що приводяться в рух електродвигуном, що працює від акумуляторної батареї, так і гібридні автомобілі (повні гібриди) або автомобілі з паливними елементами.

В першу чергу електромобілі класифікуються відповідно до того, яким чином на електричний привід подається необхідна електроенергія.

Найпростішим типом гібрида можна назвати мікро гібрид.

**Мікро гібрид.** У цьому типі автомобіля електричні компоненти використовуються тільки для функції старт/стоп. Дана система вимикає двигун, коли автомобіль стоїть на місці. Двигун запускається автоматично після відпускання гальма і натискання педалі акселератора або педалі зчеплення в залежності від типу трансмісії.

Система Старт/стоп має ряд суттєвих недоліків. Збільшує число пусків двигуна, які повинна забезпечити акумуляторна батарея, а також підтримує всі електричні навантаження на автомобіль, поки двигун не працює. Що істотно зменшує ресурс АКБ.

Для вирішення цієї проблеми потрібні нові електронні методи контролю стану батареї, в тому числі State of Charge (SOC) і State of Health (SOH).

Також дана система не працюватиме, якщо температура навколишнього середовища буде нижче 0°C.

Отже, хоча й різні виробники транспортних засобів заявляють, що при використанні стандартних європейських циклів їзди, економія палива до 8% досягається шляхом установки системи «Стоп / Старт».

Але на практиці зекономлені на паливі гроші не покривають витрати на обслуговування автомобіля. Оскільки ця система збільшує навантаження на стартер, акумулятор і двигун.

Наступний тип гібридів це – м'які гібриди

**Середні гібриди.** Середній гібрид більш складний. У таких автомобілях встановлюється електродвигун потужністю 30-60 кВт. Електродвигун підтримує двигун внутрішнього згорання. Тобто не можна керувати виключно електрикою. Середні гібриди мають систему рекуперативного гальмування.

Але слід зазначити, що різні м'які гібридні установки працюють по-різному. Наступний тип гібридів це – повні гібриди

**Повний гібрид.** Повністю гібридні автомобілі можуть працювати тільки від акумулятора без використання традиційного двигуна. Це робить їх більш економічними, ніж середні гібриди. Електродвигун використовується на низьких швидкостях, де електродвигун набагато ефективніше ДВС. Це також означає, що ДВС не працює на холостому ході при зупинці автомобіля. Результат – високоефективний автомобіль для їзди по місту.

Toyota Prius є найбільш добре відомий повним гібридним автомобілем. Іншим прикладом повного гібриду є Ford Escape Hybrid, який є винятком для більшості гібридів, в тому сенсі, що це позашляховик. Більшість гібридів є зазвичай легкими транспортними засобами, оскільки їм потрібно менше енергії для руху.

Наступний тип гібридів це – PHEV гібриди

**PHEV.** Акумулятори PHEV можна заряджати за допомогою розетки або зарядної станції, за допомогою ДВС або за допомогою рекуперативного гальмування. Транспортний засіб зазвичай працює на електроенергії до тих пір, поки не розрядиться акумулятор, а потім автомобіль автоматично перемикається на використання ДВС.

Наступний тип гібридів це – RXBEV гібриди

**RXBEV.** Також можна зустріти такий підтип гібридів як – RXBEV. RXBEV це електромобілі зі збільшеним запасом ходу. Ви скажете: «Так чим він відрізняється від PHEV?». А відмінність є, і досить таки суттєва. Справа в тому, що RXBEV – це повноцінні електромобілі. Вони здатні їхати виключно на електричній тязі, до моменту виснаження акумуляторних батарей. Після цього в дію вступає ДВС, однак його зусилля спрямовані не на обертання коліс, а на вироблення енергії для живлення акумуляторів електродвигуна. У певному сенсі RXBEV – це гібрид навпаки. (фото прикладу сучасного авто – Шевроле Вольт, мабуть)

Це був останній тип гібридного автомобіля. Більш детальна інформація про переваги та недоліки гібридних установок буде обговорюватися в окремій лекції. Далі, ми повертаємося до дослідження електричних транспортних засобів.

**BEV.** Акумуляторні електромобілі, або BEV, використовують електрику, що зберігається в акумуляторній батареї, для живлення електродвигуна і обертання коліс. Коли вони розряджені, акумулятори заряджаються від електромережі, або від електричної розетки, або від спеціального зарядного пристрою.

## 2. Водневий автомобільний транспорт

Водневий транспорт - це різні транспортні засоби, які використовують в якості палива водень. Це можуть бути транспортні засоби як з двигунами внутрішнього згоряння, з газотурбінними двигунами, так і з водневими паливними елементами.

Перший двигун внутрішнього згоряння, що працює на водні, створив Франсуа Ісаак де Ріваз (англ.) Рос. (1752-1828) в 1806 році. Водень винахідник виробляв електролізом води.

У блокадному Ленінграді бензин був у дефіциті, але водень був у великій кількості. Військовий технік Борис Шелищ запропонував використовувати повітряно-водневу суміш для роботи загороджувальних аеростатів. На водень перевели двигуни внутрішнього згоряння лебідок аеростатів. Під час блокади в місті на водні працювало близько 600 автомобілів.

### Причини інтересу до водневого транспорту

Використання водню як енергоносія дозволить як істотно скоротити споживання викопних вуглеводневих палив, так і значно просунути у вирішенні екологічної проблеми забруднення атмосфери міст шкідливими для здоров'я людини складовими вихлопних газів автомобілів і тепловозів.

У 2009 році приблизно 25% викидів вуглекислого газу в атмосферу Землі вироблялося в результаті роботи різного роду транспорту. За оцінкою МЕА, вже до 2050 року це число подвоїться і продовжить рости в міру того, як в країнах, що розвиваються буде збільшуватися кількість особистих автомобілів. Крім вуглекислого газу в атмосферу викидаються оксиди азоту, відповідальні за збільшення захворюваності на астму, оксиди сірки, відповідальні за кислотні дощі тощо.

У морському транспорті найчастіше використовуються низькоякісні дешеві сорти палива. Морський транспорт викидає оксидів сірки в 700 разів більше, ніж автомобільний транспорт. За даними International Maritime Organization викиди CO<sub>2</sub> морським торговим флотом досягли 1,12 млрд тонн на рік.

Іншою причиною підвищення інтересу до водневого транспорту є зростання цін на енергоносії (в даний час переважна їх більшість - вугілля, нафта і їх похідні), дефіцит палива, прагнення різних країн знайти енергетичну незалежність.

Водень може використовуватися в якості палива в звичайному двигуні внутрішнього згоряння. В цьому випадку знижується потужність двигуна до 82% - 65% в порівнянні з бензиновим варіантом. Але якщо внести невеликі зміни в систему запалювання, потужність двигуна збільшується до 117% в порівнянні з бензиновим варіантом, але тоді збільшиться вихід окислів азоту через більш високої температури в камері згоряння і зростає ймовірність прогорання клапанів і поршнів при тривалій роботі на великій потужності. Крім того, водень при температурах і тисках, які створюються в двигуні, здатний вступати в реакцію з

конструкційними матеріалами двигуна і мастилом, приводячи до швидкого зносу. Також водень дуже летючий, через що при використанні звичайної карбюраторної системи харчування може проникати в випускний колектор, де також запалюється через високу температуру. Традиційні поршневі ДВЗ погано пристосовані до роботи на водні. Зазвичай для роботи на водні використовується роторний ДВЗ, так як в ньому випускний колектор значно віддалений від впускного.

### Сучасне застосування

Автомобілі на водневому паливі вже виробляються. Серед компаній, які виробляють такі автомобілі - Toyota, Honda і Hyundai. Розробкою автомобілів на водневому паливі займаються також Daimler, Audi, BMW, Ford, Nissan та ін.

У 2016 році в Німеччині був представлений перший водневий поїзд - Coradia iLint компанії Alstom, поїзд почне курсувати за маршрутом Букстехуде - Куксхафен в Нижній Саксонії з грудня 2017 року. Передбачається, що в результаті вони замінять 4 тис. Дизельних регіональних поїздів, що діють в Німеччині на не електрофіцірованих ділянках залізниць. У Alstom повідомляють, що інтерес до таких потягів також висловили Нідерланди, Данія і Норвегія.

#### **В обмеженій кількості випускаються:**

BMW Hydrogen 7 і Mazda RX-8 Hydrogen RE - двопаливними (бензин / водень) легкові автомобілі. Використовують рідкий водень.

Audi A7 h-tron quattro - прототип електро-водневого гібридного легкового автомобіля.

Автобус Ford E-450 у варіанті з водневим двигуном.

Міські низькою підлогою автобуси на водневому паливі компанії MAN Truck & Bus .

### Транспортні засоби на паливних елементах

Останній тип автомобілів в нашій класифікації це Fuel cell battery electric vehicles (FCBEV).

**FCBEV.** Транспортні засоби на паливних елементах використовують газоподібний водень для живлення електродвигунів. На відміну від звичайних транспортних засобів, що працюють на бензині або дизелі, легкові і вантажні автомобілі з паливними елементами об'єднують водень і кисень для виробництва електроенергії.

Так як вони працюють виключно на електриці, транспортні засоби на паливних елементах вважаються електромобілями («електромобілями»), але на відміну від інших електромобілів їх дальність і процеси заправки можна порівняти зі звичайними легковими та вантажними автомобілями з ДВС.

На їх заправку йде менше 10 хвилин. Після заповнення автомобіль на паливних елементах може проїхати від 200 до 300 миль (322-483 km).

Але автомобілі з паливними елементами мають ряд недоліків:

1. Висока ціна.

2. Вибухонебезпечна суміш водню і повітря.
3. Водень зберігається в резервуарах високого тиску (35 МПа і 70 МПа).
4. Для заправки воднем потрібна мережа спеціальних АЗС.
5. Водень важко утримувати в рідкій формі (він має найбільшу летючість серед газів). Наприклад, всього за 9 днів половина паливного бака BMW Hydrogen 7 випаровується.
6. Процес виробництва водню є енергоємним.
7. Автомобілі з водневою установкою погані при низьких температурах.

**Лекція № 5 (2 год)**  
**Тема 2 Класифікація електромобілів та гібридів**

## **АВТОБУСНИЙ ТРАНСПОРТ. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ**

### **1. Визначення автобусного транспорту**

Автобус (скорочення від автомобіль-онібус) – безрейковий механічний транспортний засіб, призначений для перевезення 8-ми і більше пасажирів, і приводиться в рух енергією, запасеної, або виробленої з палива, що зберігається на борту, або з будь-яким іншим видом автономної тяги (автобус в традиційному розумінні). У більш широкому сенсі автобус – будь безрейковий самохідний транспортний засіб, технічно призначений для перевезення пасажирів і здатне маневрувати на дорозі. При цьому неважливо використовує автобус бортове джерело енергії, або живляться енергією ззовні через контактну мережу (тролейбуси), або використовують гібридну систему харчування (тролейбуси з системами автономного ходу, дуобус). Зокрема тролейбус живиться електроенергією через контактну мережу тим не менше володіє багатьма якостями автобуса: самохідність, безрейковий хід, маневреність (у тому числі: здатність перебудовуватися з одного ряду руху в інший і, отже, об'їжджати перешкоди). Тролейбус цілком можна вважати особливим різновидом автобуса. Звичайно, тролейбуси володіють меншою ніж звичайний, повністю автономний, автобус маневреністю. Обмежувальним чинником у даному випадку є довжина струмознімальних штанг. Обрив проводів контактної мережі здатний блокувати рух на цілому сегменті тролейбусної мережі. Але сучасні тролейбуси, що оснащуються системами автономного ходу і системами автоматичного підйому штанг, що знімають струм, зберігають переваги тролейбуса та практично вже ні в чому не поступаються звичайному автобусу в маневреності і здатні пройти до 1-3 км на автономному ходу. Зокрема це дозволяє такому тролейбусу успішно об'їжджати перешкоди з опущеними штангами. Також такий тролейбус нечутливий до обривів проводів контактної мережі, і здатний подібно звичайному автобусу здійснювати короткі об'їзди ділянок ліній, по яких рух з якоїсь причини (наприклад через ремонт дороги) неможливо. Отже, для повноти розгляду необхідно привести класифікацію автобусів та розкрити їх призначення.

### **2 Класифікація автобусного транспорту**

За призначенням:

– міські – автобуси, призначені для використання в якості міського громадського лінійного (маршрутного) пасажирського транспорту, рисунок 1.1. Міський автобус робить часті зупинки, на яких висаджує і

приймає на борт велику кількість пасажирів. Такий автобус повинен мати широкі двері і проходи, накопичувальні майданчики, поручні для стоячих пасажирів. Можуть бути представлені особливо різновидом – маршрутними таксі;



Рисунок 1.1 – Міський автобус

– міжміські – автобуси, призначені для перевезення людей на далекі відстані, рисунок 1.2. Такі автобуси повинні мати зручні крісла з відкидною спинкою, великий обсяг багажного відділення, місця для ручної поклажі, і іноді туалет. Спальні – різновид міжміських автобусів – автобуси, оснащені спальними місцями;



Рисунок 1.2 – Міжміський автобус

– приміські – на відміну від міжміських не призначені для перевезень на далекі відстані, а від міських їх відрізняють рідкісні зупинки: нерідко проміжні зупинки і зовсім можуть бути відсутні, рисунок 1.3. Такі автобуси зазвичай не мають багажних відділень, але мають місця для ручної поклажі. У них зазвичай відсутні накопичувальні майданчики, але можуть бути присутніми поручні для стоячих пасажирів. Але основний спосіб проїзду пасажирів у них – це сидючи в пасажирських кріслах;



Рисунок 1.3 – Приміський автобус

– туристичні – міжміські автобуси, призначені для поїздок організованих груп по довільних маршрутах, рисунок 1.4. Від лінійних міжміських відрізняються, як правило, підвищеним рівнем комфорту і наявністю місця їди, обладнаного мікрофоном для проведення екскурсій;



Рисунок 1.4 – Туристичний міжміський автобус

– перонні (аеродромні) – призначені для доставки пасажирів від аеровокзалу до літаків і від літаків до аеровокзалу, рисунок 1.5;



Рисунок 1.5 – Аеродромний автобус

– шкільні – автобуси, призначені для перевезення дітей. Такі автобуси повинні оснащуватися технічними засобами для підвищення безпеки перевезення дітей: ременями безпеки, спеціальними світловими і звуковими сигналами, рисунок 1.6. Також такі автобуси оснащують більш низькими підніжками, поручнями на невеликій висоті, полицями для ручної поклажі;



Рисунок 1.6 – Шкільний автобус

– екскурсійні - призначені для екскурсійних поїздок, рисунок 1.7;



Рисунок 1.7 – Екскурсійний автобус

– вахтові (експедиційні) – призначені для перевезення робітників до місць проведення будівельних, ремонтних і інших робіт, рисунок 1.8. Технічно це можуть бути найрізноманітніші пасажирські автотранспортні засоби, але досить часто такі автобуси будуються на вантажній базі;



Рисунок 1.8 – Вахтовий автобус

– всюдиходи – для перевезення людей при складних дорожніх умовах (у тому числі по бездоріжжю), рисунок 1.9;



- Рисунок 1.9 – Автобус – всюдихід  
 – вантажні (вантажопасажирські), рисунок 1.10;



Рисунок 1.10 – Вантажопасажирський автобус

- поштові (автобуси зв'язку) – для перевезення пошти, рисунок 1.11;



Рисунок 1.11 – Поштовий автобус

- ритуальні – призначені для перевезення померлого і похоронної процесії до місця поховання, рисунок 1.12.



Рисунок 1.12 – Ритуальний автобус

За довжиною:

- особливо малі (до 5,5 м);
- малі (до 6 м);
- середні (до 8 м);
- великі (до 10 м);
- особливо великі (10 м і більше).

По конструкції і компонуванню:

- передньо-моторні;

- задньо-моторні;
- центральномоторні;
- капотної компоновки;
- беськапотної (вагонної) компоновки;
- низькопольні;
- високопольні (високопалубні);
- поодинокі;
- зчленовані;
- півтораповерхові;
- двоповерхові;
- напівпричепи;
- причепи.

За типом і технічної схемою рухової установки:

- бензинові (як правило, на карбюраторних бензинових ДВЗ);
- дизельні (на дизельних ДВЗ) - найбільш поширений тип сучасних автобусів;
- електричні (акумуляторні і суперконденсаторні) - досить молодий вид автобусів, але досить перспективний в якості міського автобуса;
- автобус на паливних елементах – в якості палива найчастіше використовується водень, реакція якого з атмосферним киснем в паливних елементах генерує електроенергію, живильну тягові електромотори такого автобуса;
- дуобус – технічно гібрид тролейбуса і звичайного (а саме дизельного) автобуса. Використовує два основні джерела живлення: може як використовувати тролейбусну контактну мережу так і рухатися за рахунок, дизельного ДВЗ.

Особливий різновид автобуса – тролейбус. Тролейбуси, оснащені новітніми системами автономного ходу, зберігаючи переваги тролейбуса, вже практично ні в чому не поступаються звичайному автобусу. Найбільш перспективні тролейбусні системи автономного ходу будуються на базі суперконденсаторів і акумуляторів, що можуть швидко заряджатися, які дозволяють проїхати тролейбусу в режимі автономного ходу до 3 км, і на базі паливних елементів, що дозволяють тролейбусу їхати як використовуючи для живлення контактну мережу.

Представлена класифікація автобусів та розподіл їх за призначенням дозволяє чітко визначитись з метою роботи та запропонувати, яка полягає в розробці електробусу на суперконденсаторах для міських перевезень.

Для досягнення поставленої мети слід докладно розглянути існуючі види електробусів та гібридних автобусів, що й представлено у наступному розділі.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гнатов А. В. Електромобілі – майбутнє, яке вже настало / А. В. Гнатов, Щ. В. Аргун, О. А. Ульянець // Автомобиль и электроника. Современные технологии: электронное научное специализированное издание. – Х.: ХНАДУ, 2017. – № 11. – С. 24-28. – ISSN 2226-9266– Режим доступа: [http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P\\_SIS/AE17\\_1/1.4.pdf](http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE17_1/1.4.pdf)
2. Vehicle Emission Standards. 2016. Available online: <https://infrastructure.gov.au/roads/environment/emission>.
3. G. Wang, “Advanced vehicles: costs, energy use, and macroeconomic impacts”, Journal of Power Sources, vol. 196, no. 1, pp. 530–540, 2011.
4. Чернышев А.Д. Сравнительный анализ различных типов электрических двигателей в составе тягового привода электрической трансмиссии / Чернышев А.Д. // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Том 3, №3. – С. 47-54.
5. Радионов А.А. Формирование технических требований к автомобильной трансмиссии / А.А. Радионов, А.Д. Чернышев // Наука и производство Урала. – 2015. – №11. – С. 85-89.
6. Слепцов М.А. Основы электрического транспорта / М.А. Слепцов, Г.П. Долаберидзе, А.В. Прокопович, Т.И. Савинова, В.Д. Тулупов. – М: Издательский центр “Академия”, 2006. – 464 с.
7. Philip Dost; Michael Schael; Constantinos Sourkounis. Comparison of Control Methods for Asynchronous Motors within Electric Vehicles. 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 2014. Pages: 1 - 6.
8. Chuanwei Zhang; Nuoting Wang. Research on asynchronous motor control of electric vehicle. 2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC). 2017. Pages: 165 - 1693.
9. Ene Lucian-Vasile; Sănătescu Diana-Ramona. Electric drive system for speed adjusting of a three-phase asynchronous motor using a PLC for propelling an electric vehicle. 2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). 2017. Pages: 597 - 600.
10. Rogério Paulo de F. Martins; Duarte M. Sousa; V. Fernão Pires; António Roque. Reducing the power losses of a commercial electric vehicle: Analysis based on an asynchronous motor control. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. 2013. Pages: 1247 – 1252.
11. Huang, Wanyou; Wang, Guangcan; Yu, Mingjin. Analysis of the effect of driving motor on electric vehicle dynamic performance. INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES. 2017. – Volume: 9. – Issue: 4. – Pages: 350-360.
12. Автобус // Матеріали сайту – 2018. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Автобус>.

## Лекція № 6 (2 год) Тема 2 Класифікація електромобілів та гібридів

### СУЧАСНА ЕКОЛОГІЧНА АВТОБУСНА ТЕХНІКА

#### 1 Електробуси та гібридні автобуси

Автобусний транспорт – це один з видів транспорту, що найбільш швидко розвивається в області енергоефективних технологій. Причинами цього стало введення більш жорстких екологічних норм, а також прагнення зменшити експлуатаційні витрати, як приватними підприємствами, так і державними організаціями. Тому гібридні технології (суміщення двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) з електродвигуном) та електротехнології знайшли своє застосування не тільки в легкових автомобілях, але також і в автобусах.

Гібридні автобуси дозволяють максимально знизити витрату палива, забезпечуючи мінімальний викид шкідливих речовин в атмосферу. Так, гібридна силова установка економить до 60 % енергії в порівнянні з традиційними дизельними агрегатами (при цьому зниження споживання палива доходить до 30 %), не кажучи вже про зниження шкідливих викидів в атмосферу на 70 %.

Існує кілька видів конструкцій гібридних автобусів. Одна з них представлена на рисунку 2.1.

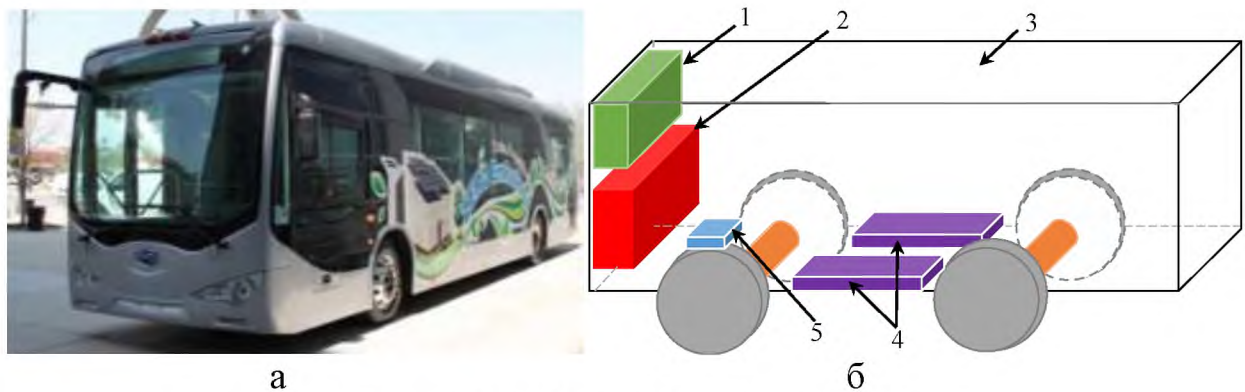


- 1 - АКБ; 2 - силова система контролю та управління; 3 - система охолодження;  
4 - ДВЗ; 5 - електрогенератор; 6 - електродвигун

Рисунок 2.1 – Конструкція гібридного автобуса

На сьогоднішній день гібридний автотранспорт має одну з істотних переваг у порівнянні з електромобілями – велику автономність ходу за рахунок наявності ДВЗ. Це пов'язано з тим, що час заправки авто бензином або дизпаливом в рази менше, ніж час зарядки акумуляторних батарей (АКБ), до того ж мережа електрозаправок ще недостатньо розвинена (особливо в країнах із середнім і низьким економічним рівнем розвитку), а ємність АКБ, на даний момент, не дозволяє здійснювати поїздки на великі відстані. Але в решті передові позиції займає саме електротранспорт. Особливо це стосується електричних автобусів (електробусів), що обслуговують короткі маршрути в межах міста.

На сьогодні турбування про навколишнє середовище стало вже не тільки трендом, а й необхідністю. Доказом тому є успішність використання електробусів для міських перевезень в розвинених країнах, рисунок 2.2. Найбільшим представником електробусів є компанія BYD Auto з моделлю K9 (Китай), рисунок 2.2,а. Ці електробуси здатні в міському режимі долати до 300 км шляху без підзарядки. Їх час зарядки становить 3 год на спеціальних терміналах [16].



а - зовнішній вид; б – конструкція;  
 1 – блок управління; 2 – система заряду; 3 корпус з алюмінієвого сплаву; 4 - АКБ; 5 – електродвигун змінного струму  
 Рисунок 2.2 – Електробус BYD K9

Компанія АВВ в Люксембурзі запустила системи автоматичного підключення на даху, що дозволяє зняти одну з головних перешкод для розширення використання міських електробусів - тривалий час зарядки з коротким проміжним пробігу (дивись рисунок 2.3) [17]. Час звичайної зарядки електробуса становить від 4 хв до 6 хв. Система може бути легко інтегрована в існуючі автобусні лінії з встановленням швидких зарядів на терміналах маршруту, зупинках, депо та (або) проміжних зупинках.



Рисунок 2.3 – Швидкий заряд електробусів (Люксембург)

Існуючі розробки електробусів дають можливість переобладнати транспортну інфраструктуру відповідно до сучасних вимог в області екологічної

безпеки і при цьому обійти стороною проблему недостатньої ємності АКБ. Але незважаючи на це, залишається серйозна проблема високої вартості таких автобусів, а також складність і дорожня обладнання для їх швидких зарядок. Звичайно, можна збільшити ємність АКБ шляхом нарощування їх кількості, але це призводить до збільшення їх маса-габаритних показників. Тому проблема енергоємних АКБ для електротранспорту також є актуальною.

## 2 Електробус на паливних елементах

Ще одним альтернативним видом енергії для автотранспорту є паливний елемент. Паливний елемент, призначений замінити ДВЗ, складається з безлічі чарунк (маленьких генераторів). Напруга кожної чарунки від 0,6 В до 1,0 В. Поєднавши чарунки послідовно, можна отримати необхідну напругу. Сучасні технології дозволяють робити чарунки товщиною до 1,5 мм. Отже, можна домогтися того, що маса і габарити такої паливної установки залишаться тими ж, що і у ДВЗ без втрати потужності [18].

Основна перевага впровадження паливних елементів в автотранспортній техніці – це високий ККД. Наприклад, ККД сучасного автомобільного ДВЗ досягає від 30 % до 35 %, а ККД водневого паливного елемента - від 45 % до 85 % [19].

На автомобілях і автобусах встановлюють, як правило, паливні елементи на протон-обмінній мембрані. Їх основні переваги: компактність, мала вага, низька температура процесу.

Одним з основних недоліків паливної установки є її ціна (приблизно в 100 разів дорожче ДВЗ), тому що при її виготовленні використовуються дорогі матеріали і досить складні, енергоємні технології.

Але незважаючи на це в ЄС була прийнята програма Clean Hydrogen in European Cities (СНІС), що передбачає вихід на міські маршрути гібридних автобусів, що працюють на водні. Дана програма пропагує перехід автобусного парку на гібридні силові установки на основі водневих паливних елементів. Згідно з цією програмою вже з'явилося 26 нових автобусів з гібридними силовими установками (в Мілані, Лондоні, Осло, Больцано і Аарау) [20].

У програмі СНІС беруть участь провідні європейські виробники автобусів - німецька компанія Mercedes-Benz, бельгійська VanHool і ірландська Wright. Так, компанія VanHool використовує гібридну серію AG300, розроблену спільно з американськими компаніями UTC Power і ISE Corp. AG300 оснащений електродвигунами і паливними елементами потужністю 120 кВт, які дозволяють автобусу розвивати максимальну швидкість 105 км/год, і при повній заправці воднем забезпечують дальність пробігу до 450 км. А компанія Mercedes-Benz, використовує екологічно чистий автобус другого покоління Citaro Fuel Cell Hybrid (рисунок 2.4) [21]. Ці автобуси з запасом водню в 35 кг, мають дальність пробігу до 250 км.



а - зовнішній вид; б – конструкція;  
 1 - балони  $H_2$ ; 2 - АКБ; 3 – система управління; 4 - система охолодження;  
 5 - допоміжні компоненти; 6 – електропривод  
 Рисунок 2.4 – Електробус Citaro Fuel Cell Hybrid

Слід зазначити, що паливні елементи в якості джерела енергії для автобусів багато в чому перевершують різного типу акумуляторні батареї, так як вони мають кращі питомими енергетичними показниками. Для більшої наочності, на рисунку 2.5 показана практична дальність пробігу автотранспортного засобу з живленням від паливних елементів в порівнянні з свинцево-кислотними, нікель-метал-гідридних і літій-іонними акумуляторами [22].

Як відомо, нелінійна залежність в АКБ накладає обмеження на їх розмір і вагу. Паливні елементи володіють характеристиками, схожими з ДВЗ, і їх експлуатація для пробігу на великі відстані вимагатиме лише додаткового палива. Однак паливні елементи мають інертність і обмежений діапазон потужності, що вимагає додатково комплектувати транспортні засоби АКБ. У зв'язку з цим, автомобіль (автобус) на паливних елементах нагадує електромобіль з вбудованим зарядним пристроєм, який підтримує рівень заряду акумуляторної батареї.

Поряд з тим, що автобуси на паливних елементах є екологічно чистим видом транспорту, що безсумнівно є їхньою перевагою.

Окремо слід відзначити і недоліки автотранспортних засобів на паливних елементах [23].

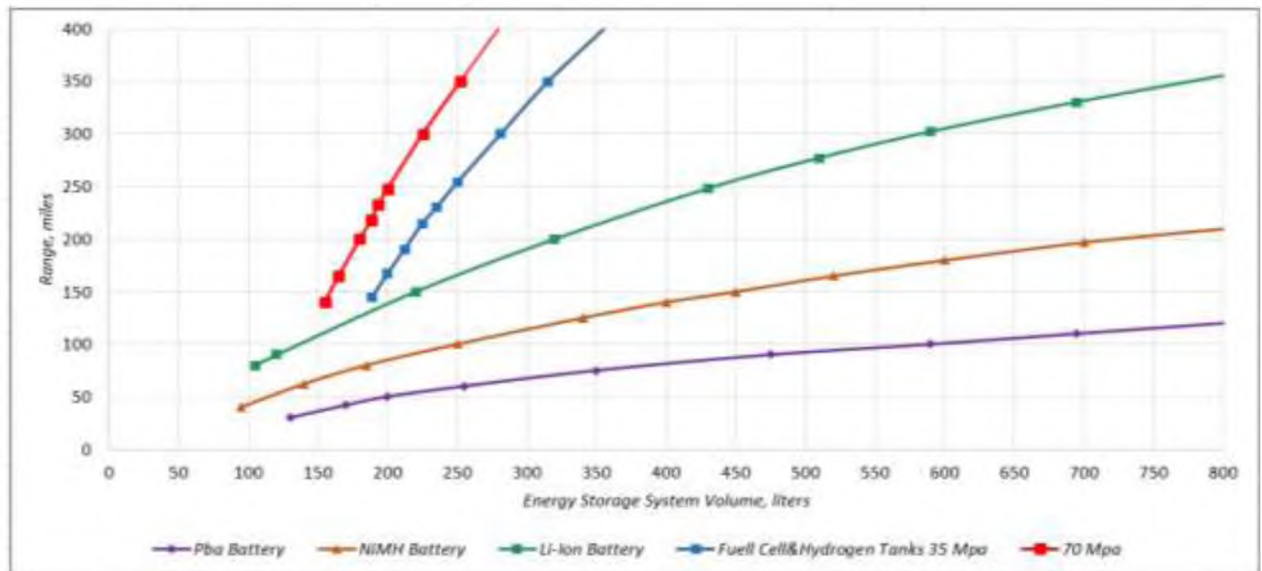


Рисунок 2.5 – Дальність пробігу в залежності від енергії, що накопичується в різних типах акумуляторів

Недоліки автотранспортних засобів на паливних елементах.

Суміш водню з повітрям вибухонебезпечна. Водень більш небезпечний, ніж бензин, так як горить в суміші з повітрям в більш широкому діапазоні концентрацій.

Водень зберігається в баках при високому тиску (35 МПа і 70 МПа). Для транспорту розробляються спеціальні безпечні системи зберігання водню - баки з багат шаровими стінками, зі спеціальних матеріалів тощо. Все це в цілому здорожує весь цикл експлуатації автотранспортного засобу.

Воднева силова установка на базі традиційного ДВЗ значно складніше і дорожче в обслуговуванні, ніж звичайний ДВЗ (від 10 до 100 разів).

Для заправки воднем потрібно побудувати мережу спеціальних заправних станцій. Для заправних станцій, що заправляють автомобілі рідким воднем вартість обладнання вище, ніж для заправних станцій, що заправляють автомобілі рідким паливом (приблизно в 10 разів).

Ціна \$ 8,47 за 1 л (що в перерахунку на бензиновий еквівалент становить \$ 2,86 за л).

Водень складно зберегти в рідкому вигляді (володіє найбільшою летючістю серед газів). Наприклад, всього за 9 дн. випаровується півбака палива BMW Hydrogen 7 [24].

Процес виробництва водню є енергозатратним. Самий простий спосіб отримання водню – це електроліз. Але для вироблення водню таким чином, слід витратити 4 кВт електроенергії, щоб виробити близько 1 м<sup>3</sup> водню, який, після того як згорить, дасть лише 1,8 кВт [25].

Всі ці недоліки зумовлюють пошук нових технологій у розвитку і реалізації екологічно чистих видів транспорту. До однієї з таких можна віднести електричні транспортні засоби з накопичувачами енергії у вигляді суперконденсаторів.

### 3 Електробус з суперконденсаторним накопичувачем енергії

Електробус з суперконденсаторним накопичувачем енергії – новий транспортний засіб є проміжною ланкою між звичайними електричним транспортом і тролейбусами. Автобус заряджається від особливо швидких зарядних установок під час посадки/висадки пасажирів і здатний їздити по маршруту без необхідності багатогодинний перезарядці батарей [26].

Наприклад, у Китаї, місто Нінбо, провінції Чжецзян, існує громадський транспорт, що використовує накопичувач енергії у вигляді суперконденсаторів. Цей електробус підзаряджається на зупинках громадського транспорту на початку та в кінці свого маршруту при посадці та висадці пасажирів (час заряду, приблизно. 10 с), дивись рисунок 2.6 [27].

Новим типом електрообусу є той, який розроблений компанією Zhuzhou Electric Locomotive. Компанія запропонувала забезпечити громадський транспорт спеціальним пристроєм на даху для швидкого заряду. На зупинках уздовж маршруту є опорні кронштейни з кріпленнями, що вставляються в шини. Одна така зарядка забезпечує 5 км пробігу автотранспортного засобу. Це працює завдяки властивостям блоків суперкондкнсаторів, що призначені для роботи понад мільйони циклів. Це, приблизно, від 12 до 15 років і мають робочі температури від  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$  [27].



Рисунок 2.6 – Електробус з суперконденсаторним накопичувачем енергії Zhuzhou Electric Locomotive

Наряду з наявними перевагами цих електробусів на суперконденсаторах є два істотних недоліки: малий пробіг на одній зарядці і необхідність у потужних та швидких зарядках, а значить і дорогих зарядних станціях, які здатні забезпечити повну зарядку блоку суперконденсаторів за декілька секунд.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гнатов А. В. Електромобілі – майбутнє, яке вже настало / А. В. Гнатов, Щ. В. Аргун, О. А. Ульянець // Автомобиль и электроника. Современные технологии: электронное научное специализированное издание. – Х.: ХНАДУ, 2017. – № 11. – С. 24-28. – ISSN 2226-9266– Режим доступа: [http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P\\_SIS/AE17\\_1/1.4.pdf](http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE17_1/1.4.pdf)
2. Vehicle Emission Standards. 2016. Available online: <https://infrastructure.gov.au/roads/environment/emission>.
3. G. Wang, “Advanced vehicles: costs, energy use, and macroeconomic impacts”, Journal of Power Sources, vol. 196, no. 1, pp. 530–540, 2011.
4. Чернышев А.Д. Сравнительный анализ различных типов электрических двигателей в составе тягового привода электрической трансмиссии / Чернышев А.Д. // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Том 3, №3. – С. 47-54.
5. Радионов А.А. Формирование технических требований к автомобильной трансмиссии / А.А. Радионов, А.Д. Чернышев // Наука и производство Урала. – 2015. – №11. – С. 85-89.
6. Слепцов М.А. Основы электрического транспорта / М.А. Слепцов, Г.П. Долаберидзе, А.В. Прокопович, Т.И. Савинова, В.Д. Тулупов. – М: Издательский центр “Академия”, 2006. – 464 с.
7. Philip Dost; Michael Schael; Constantinos Sourkounis. Comparison of Control Methods for Asynchronous Motors within Electric Vehicles. 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 2014. Pages: 1 - 6.
8. Chuanwei Zhang; Nuoting Wang. Research on asynchronous motor control of electric vehicle. 2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC). 2017. Pages: 165 - 1693.
9. Ene Lucian-Vasile; Sănătescu Diana-Ramona. Electric drive system for speed adjusting of a three-phase asynchronous motor using a PLC for propelling an electric vehicle. 2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). 2017. Pages: 597 - 600.
10. Rogério Paulo de F. Martins; Duarte M. Sousa; V. Fernão Pires; António Roque. Reducing the power losses of a commercial electric vehicle: Analysis based on an asynchronous motor control. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. 2013. Pages: 1247 – 1252.
11. Huang, Wanyou; Wang, Guangcan; Yu, Mingjin. Analysis of the effect of driving motor on electric vehicle dynamic performance. INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES. 2017. – Volume: 9. – Issue: 4. – Pages: 350-360.
12. Автобус // Матеріали сайту – 2018. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Автобус>.

13. S. B. Han, Y. H. Chang, E. Y. Lee, Y. J. Chung, and B. Suh, "Emissions simulation in a 7000 kg-grade diesel hybrid electric vehicle," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 105–110, 2010.
14. X. Hu, N. Murgovski, L. Johannesson, and B. Egardt, "Energy efficiency analysis of a series plug-in hybrid electric bus with different energy management strategies and battery sizes," *Applied Energy*, vol. 111, pp. 1001–1009, 2013.
15. Teemu Halmeaho; Pekka Rahkola; Jenni Pippuri; Kari Tammi, Hybrid city bus design evaluation using system level simulations. 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Pages: 1671 - 1676, Doi: 10.1109/ISIE.2014.6864866, 2014.
16. Електробус BYD К9// Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://internetua.tv/index.php/press-releases/3120-byd-5.html>.
17. ABB launches fast charging robot for public buses. 2016. Available online: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/bc2c3a332d7a35c5c1257ee3002d9a19.aspx>.
18. Pablo Garcia; Luis M. Fernandez; Carlos Andres Garcia; Francisco Jurado. Fuel cell-battery hybrid system for transport applications. 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems. Pages: 1 - 5, Doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382685, 2009.
19. Amir Al-Ahmed; Safdar Hossain; Bello Mukhtar; S. U. Rahman; Habib Abualhamayel; Javaid Zaidi. Hydrogen highway: An overview. 2010 IEEE International Energy Conference. Pages: 642 - 647, Doi: 10.1109/ENERGYCON.2010.5771760, 2010.
20. C. Carnevali; R. Genova; P. Jenné; M. Mazzuchelli; M. Reijalt; G. Priano. Fuel cell electric buses and perspectives: High V.LO-city project authors. 2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON). Pages: 1039 - 1043, Doi: 10.1109/EnergyCon.2012.6347722, 2012.
21. Hybrid Fuel Cell Buses for Hamburger Hochbahn. 2011. Available online: <http://www.showtimesdaily.com/fleetsfuels/2826>.
22. Best energy. 2016. Available online: <https://best-energy.com.ua/support/battery/1188-bu-1005>.
23. Hydrogen explosion. 2008. Available online: <http://www.companion.ua/articles/content?id=17937&Callback=72>.
24. The world's fastest charging electric bus powers up in 10 seconds flat. 2015. Available online: <http://inhabitat.com/the-worlds-fastest-charging-electric-bus-powers-up-in-10-seconds-flat/>.
25. Sanae Dahbi; Abdelhak Aziz; Naima Benazzi; Mohamed Elhafyani, Optimised hydrogen production by a photovoltaic - Electrolysis system DC/DC converter and water-flow controller. 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Pages: 1 - 6.
26. Гнатов А. В. Автобусный транспорт, назначение и классификация. Электробус на суперконденсаторах / А. В. Гнатов, А. В. Пидгора // Автомобиль и электроника. Современные технологии: электронное

научное специализированное издание. – Х.: ХНАДУ, 2017. – № 11. – С. 5-12. – ISSN 2226-9266– Режим доступа: [http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P\\_SIS/AE17\\_1/1.1.pdf](http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE17_1/1.1.pdf).

27. The world's fastest charging electric bus powers up in 10 seconds flat. 2015. Available online: <http://inhabitat.com/the-worlds-fastest-charging-electric-bus-powers-up-in-10-seconds-flat/> (accessed on 3 July 2016).

## Лекція № 7 (2 год)

### Тема 3 Економічний та екологічний вплив електричних АТЗ

#### 1. Вплив автомобільного транспорту на навколишнє середовище

Оскільки сучасна культура і технології продовжують розвиватися, зростаюча присутність глобального потепління і незворотні зміни клімату викликають все більшу стурбованість у населення світу.

Країни всього світу працюють над тим, щоб радикально скоротити викиди CO<sub>2</sub>, а також інших шкідливих забруднювачів навколишнього середовища. Серед найбільш помітних виробників цих забруднювачів – автомобілі, які приводяться в рух двигунами внутрішнього згоряння і викидають шкідливі для здоров'я викиди.

За різними даними, на легкові та вантажні автомобілі припадає майже 25% викидів CO<sub>2</sub>, а інші транспортні засоби – ще 12%.

Однією з можливих альтернатив світової залежності від стандартних автівок на ДВЗ є електромобілі. Давайте обґрунтуємо це твердження.

Щоб оцінити вплив електромобілів на навколишнє середовище, потрібно розглянути кілька питань:

- 1) забруднення відпрацьованими газами автомобілів;
- 2) економічність палива;
- 3) джерела енергії;
- 4) ефективність автомобіля.
- 5) економічні показники
- 6) відпрацьовані акумулятори

#### 2. Викиди електричного автомобіля

Існує досить поширений міф, що електромобілі так само забруднюють навколишнє середовище, як і автівки з ДВЗ. Просто, процес забруднення переноситься на стадію виробництва електрокара та процес генерації електроенергії. Це помилкове судження і воно повністю не відповідає дійсності.

Отже, почнемо з аналізу широко відомих фактів.

Електромобілі дуже сильно знижують викиди CO<sub>2</sub>. Так як електромобілі працюють на електриці, вони не виділяють вихлопних газів. Якщо проводити оцінку тільки за цим фактором, то електромобілі набагато більш екологічні, ніж звичайні.

Проте, при оцінці екологічності електромобіля, нам також необхідно прийняти до уваги викиди «well-to-wheel». Це всеосяжний термін, який включає в себе викиди парникових газів, енергоефективність і виробничі витрати.

Беручи до уваги викиди «well-to-wheel», кожен електромобіль викидає в середньому близько 4450 фунтів (2020 кг) в еквіваленті CO<sub>2</sub> щороку. Для порівняння, звичайні бензинові автомобілі будуть викидати **в два рази більше** в рік.

**Джерела енергії.**

Важливо відзначити, що кількість викидів «well-to-wheel» в EV залежить від способу виробництва електроенергії. Наприклад: вироблення електроенергії з природного газу або при перетворення вугілля або на атомних станціях. До речі, природний газ часто вважається «найчистішим» викопним паливом, тому що він виділяє на 50-60 % менше вуглекислого газу, ніж вугілля.

### **3. Ефективність та економічні показники електромобіля**

Ще одна причина, по якій електромобілі вважаються більш екологічними, ніж традиційні, полягає в тому, що ефективність електромобілів вища.

ККД електродвигуна дорівнює приблизно 90-95%. У той час як ККД ДВЗ двигуна знаходиться в районі 20% (дизельні біля 25 %).

Давайте розглянемо приклад щоб стало зрозуміліше. Ми порівнюємо електромобіль Tesla модел 3 і автомобіль з ДВЗ – BMW 3 серії. Важливо, щоб автомобілі були одного класу.

Отож, з одного літра нафти можна отримати від 150 до 800 мл бензину. Це залежить від способу виробництва бензину. БМВ при заявленій витраті 6,4 л на 100 кілометрів в змішаному циклі на 800 мл бензину проїде всього 12,5 км.

З електромобілем все цікавіше. При спалювання 1 літра нафти на сучасній тепловій електростанції з ККД у 40% ми отримуємо 3,4 кВт·год енергії. Заявлена виробником витрата у Модел 3 дорівнює 500 км від батареї на 74 кВт·год. А це значить що тесла проїде 23 км. Тобто майже в два рази більше ніж БМВ.

До того ж ми взяли найефективніший спосіб виробництва бензину. Якби бензин виготовляли способом перегонки, то різниця була б в 10 разів на користь електромобіля.

А ще слід врахувати те, що палива потрібно доставляти на заправну станцію бензовозом якому теж потрібен бензин.

#### ***Економічні показники.***

Щоб не бути багатослівним приведу приклад з життя.

Власниця Tesla Model S виклала статистику експлуатацію свого авто. За 5 років вона проїхала 120 тисяч км. Їздила вона виключно по місту, а заряджала автомобіль в гаражі. Вона витратила майже 26 тисяч кВт·год енергії за які заплатила трохи більше 2000 доларів.

Якщо ми візьмемо аналогічний автомобіль з двигуном внутрішнього згоряння, то витрати на паливо склали б близько 14-15 тисяч доларів.

Ще одна причина економічності EV це відсутність постійного технічного обслуговування.

Автомобілі з ДВЗ складаються з декількох тисяч деталей. Багато з яких піддаються тертю і з часом вимагають заміни.

Навіть гальмівні колодки в електромобілях мають більший ресурс за рахунок рекуперативного гальмування.

Електродвигун складається з ротора і статора де зноситися можуть тільки підшипники.

Ресурс ДВЗ кілька сотень тисяч кілометрів і більшість з них вимагає серйозного ремонту кожні, приблизно, 150 тис. км. А, наприклад, Tesla Module 3, гарантовано може проїхати 1 млн. 600 тис. км. і не вимагати ремонту. До того ж, ніхто не враховує витрати енергії і викиди CO<sub>2</sub> при виробництві витратних матеріалів, а їх чимало.

Третя причина це розвиток відновлюваної енергетики. Сьогодні на це звертають дуже багато уваги. Це і субсидії від держави і Паризька угоду щодо зниження викидів. Наприклад, в Північній Америці за останні 8 років ціна мегавата електрики отриманого від сонця знизилася з \$ 350 до \$ 50. Вже зараз у багатьох країнах вироблення сонячної енергії дешевше, ніж від традиційних теплових електростанцій. Ця різниця у ціні буде постійно збільшуватися, адже запаси вуглеводнів обмежені.

Під поновлюваними джерелами енергії мається на увазі не тільки сонячні електростанції та вітроелектростанції, а й гідроелектростанції, геотермальні та приливні станції, а також біоенергетика. Деякі країни і окремі міста показують високий відсоток генерації від таких джерел і планують перейти на них повністю.

Ще одним важливим плюсом електромобілів є стабілізація енергосистем.

Справа в тому, що електрика на станціях виробляється впродовж доби рівномірно, а навантаження на мережу постійно скаче. Наприклад, вночі енергії потрібно набагато менше ніж днем, але генератори електростанції продовжують виробляти електрику. Виходить, що невживана енергія розсіюється. А це зовсім не економічно. Але тут на допомогу приходять електромобілі. Якщо вночі підключати їх до мережі, то вони могли б запасати це електрику. А потім віддавати енергію назад в мережу для стабілізації енергосистеми. Це стає можливим завдяки все більшому запасу ходу сучасних електрокарів, від 300 км. Адже згідно дослідження, в середньому, автомобіль проїжджає всього 30 км. в день. Такі системи стабілізації вже розробляють деякі виробники, наприклад Nissan.

#### 4. Утилізація акумуляторних батарей.

І ще одне важливе питання – це утилізація батарей. Проблема цікавить не тільки екологів а й самих виробників. В акумуляторі міститься нікель, кобальт, мідь, літій та інші метали в залежності від типу батарей. І отримання цих металів від переробки акумуляторів в рази дешевше і простіше, ніж їх видобуток.

Сучасні тягові акумулятори досить довговічні. Наприклад, сервіс таксі **НАЗВА** поділився даними про експлуатацію Tesla Model X. Після 480 тисяч кілометрів пробігу батарея деградувала всього лише на 10% і навіть після падіння ємності акумулятора більш ніж на 30% його ще можна використовувати в системах стаціонарного зберігання енергії, подібним Tesla Powerwall та Powerpac.

Отже, відпрацьовані акумулятори це дійсно велика проблема, але рішення цієї проблеми знайдено. Я розповім про один з найбільш ефективних методів утилізації на даний момент. Цей метод належить компанії Duesenfeld.

Суть технології. На початку акумуляторну батарею, розбирають і сортують за типом елементів. Далі компоненти акумуляторів не спалюють, як прийнято зараз, а подрібнюють під тиском і за допомогою газоподібного азоту запобігають будь-які подальші реакції в батареї.

По факту залишаються тільки чорні і кольорові метали, порошок з літію, залишки катода з нікелем, марганцем і кобальтом.

Таким чином, більша частина батареї може бути збережена для подальшого використання.

### **Недоліки.**

З негативних моментів можна відзначити те, що виробництво електромобіля є більш енерговитратним ніж автомобіля на ДВЗ. Це все через величезні батареї, що вимагають відповідних виробничих ресурсів. Але, також слід зазначити, що енергоємність акумуляторів постійно зростає, і виробничі потужності, в перерахунку на автомобіль, скорочуються. Знову ж таки, не варто забувати про екологічність виробництва. Наприклад, на даний момент, Мегофабрика Тесла частково живиться від сонячної енергії і коли вона буде повністю розбудована, то 100% енергії буде отримуватися від відновлювальних джерел. Все це вселяє впевненість, що ми рухаємося в напрямку екологічного сталого виробництва та споживання.

Цей аналіз показав, що гібридні і електричні автомобілі мають перевагу в порівнянні з іншими. Звичайно не все так ідеально як хотілося б, але, давайте не забувати, що наука не стоїть на місці. І можливо, що саме ми будемо двигуном наукового прогресу у майбутньому.

Ну а поки що, не забувайте переглядати вкладені мною матеріали. І обов'язково пройдіть невеликий тест після лекції.

## Лекція № 8 (2 год)

### Тема 3 Економічний та екологічний вплив електричних АТЗ

#### 1. Електромобілі – майбутнє, яке вже настало

Бурхливий розвиток транспорту призвів до низки серйозних проблем, таких як: погіршенню екології ситуації, дефіциту енергоресурсів, збільшення аварійності, потреба в нових кваліфікованих фахівцях в енергоефективних та енергосберігаючих технологіях на транспорті, тощо. Отже, впровадження в навчальний процес магістерської спеціальності «Електромобілі та енергосберігаючі технології» є нагальною потребою не лише тільки для України а й для всього цивілізованого Світу. Особливо актуальним це питання постає в умовах концепції сталого розвитку [1,2].

Під сталим розвитком розуміється загальна концепція необхідності встановлення балансу між задоволенням сучасних потреб людства і захистом інтересів майбутніх поколінь, включаючи їх потребу в безпечному і здоровому довкіллі [3]. Саме визначення вказує на актуальність спеціальності «Електромобілі та енергосберігаючі технології» для автотранспортної галузі.

Останнім часом стрімко зросла кількість гібридних та електромобілів, які потребують абсолютно нової концепції в розвитку інфраструктури для їх обслуговування та ремонту. Успішний розвиток і популяризація екологічно чистого автомобільного транспорту неможливі без побудови широкої міської та заміської мережі зарядних станцій для електромобілів і автомобілів plug-in hybrid. Такі зарядні станції повинні бути обладнані відповідно до чинних норм екологічної безпеки, з максимальним застосуванням поновлюваних і альтернативних джерел електроенергії, як то сонячні батареї, вітрогенератори тощо [4-6].

Розвиток інфраструктури сучасної транспортної мережі має на увазі і впровадження комплексів засобів під загальною назвою «Розумні дороги», до яких відносяться: інтерактивне освітлення дороги, індикація стану поверхні дороги в залежності від погодних умов, бездротова підзарядка електромобілів під час руху, активна розмітка дороги, з можливістю швидкого перерозподілу режимів і смуг руху в залежності від завантаженості доріг і т.п. Такий тип доріг являє собою складну електротехнічну інформаційну систему, здатну самостійно та повністю автономно працювати і забезпечувати електричною енергією не тільки свої потреби, а й потреби інших електроспоживачів. Зокрема мова йде про розширення і інтеграції в сучасну транспортну інфраструктуру енергосберігаючих технологій згідно вимог сучасних видів енергоефективного транспорту [7-10].

Загальна мета цієї лекції це удосконалення вищої освіти відповідно до змінних потреб економічної і соціальної сфери в транспортній галузі, що обумовлюються зростанням сектора інноваційних енергоефективних та ене-

ргозберігаючих технологій. Реалізація запропонованої магістерської спеціальності призведе до підвищення конкурентності випускників університетів в працевлаштуванні і розширення співробітництва між вищих навчальних закладів.

## 2. Електромобілі та енергозберігаючі технології

Для планування та реалізації сталого розвитку енергоефективної автотранспортної інфраструктури потрібні відповідні кадри – фахівці, здатні проводити розробку і проектування таких систем, а також технічне обслуговування та ремонт, як самих гібридних та електромобілів, так і електричних, електронних та інформаційних систем інфраструктури.

Впровадження в навчальний процес такої спільної (не тільки для ВУЗів України, а й для університетів інших держав Європи та Світу) освітньої програми призведе до отримання загальних (подвійних, багатосторонніх) дипломів магістра за спеціальністю «Електромобілі та енергозберігаючі технології». Що, в свою чергу, є одним з пріоритетів співробітництва в сфері освіти не тільки в Європі, але і у всьому Світі. Наслідком цих нововведень буде модернізація освіти і поліпшення її якості та ефективності.

Магістри за фахом «Енергозберігаючі технології на транспорті» вже на даний момент є потрібними на ринку праці, оскільки сучасні виробничі та проектні компанії зацікавлені в зростанні своєї продуктивності і, в кінцевому рахунку, конкурентоспроможності, одним із шляхів досягнення якого, в нинішніх умовах, є використання енергозберігаючих технологій та енергоефективного транспорту.

Загальною метою втілення запропонованої спеціальності є вдосконалення вищої освіти відповідно до потреб економічної і соціальної сфери в транспортній галузі зумовленої зростанням сектора інноваційних енергоефективних та енергозберігаючих технологій, а також для підвищення конкурентоспроможності випускників університетів в працевлаштуванні і розширення співробітництва між ВНЗ.

Показники прогресу, що очікуються від втілення запропонованої спеціальності.

1. Поліпшення якості вищої освіти.
2. Модернізація вищої освіти для електротехнічних спеціальностей.
3. Поліпшені компетенції та навички ВНЗ.
4. Використання можливостей сучасних ІТ-технологій у вищій освіті.
5. Розширення міжвузівського співробітництва та обмін передовим досвідом між різними регіонами країни (Європи, Світу) в області енергозберігаючих та енергоефективних технологій, електромобілів і транспортної інфраструктури.
6. Підвищення обізнаності громадськості в питанні модернізації системи вищої освіти по електротехнічним спеціальностям.
7. Збільшення числа висококваліфікованих фахівців в області енергоефективних та енергозберігаючих технологій.

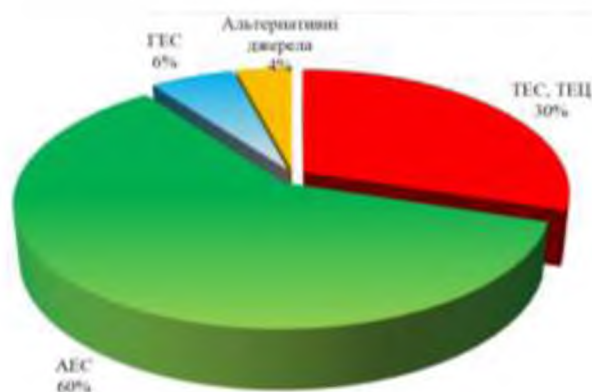
Доцільність такої нової спеціальності для освіти в Україні складно переоцінити. Найбільш вагомим аргументам тут виступає сама державна політика щодо відновлюваної енергетики.

На думку експертів Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, одним з головних елементів зваженої державної політики щодо розвитку сфери відновлюваної енергетики, є прийняття законодавчих актів, які стимулюють її розвиток. Для виконання зобов'язань перед Енергетичним співтовариством уряд затвердив Національний план дій з відновлюваної енергетики до 2020 р., який розроблено відповідно до вимог Директиви №2009/28/ЄС про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел [12-14]. Метою документа є досягнення в 2020 р. частки енергії, отриманої з поновлюваних джерел в кінцевому енергоспоживанні країни, на рівні 11%. Виконання плану в повному обсязі дозволить до цього терміну скоротити використання традиційних паливно-енергетичних ресурсів в обсязі 8,6 млн. тон нафтового еквівалента/рік (10,1 млрд. м<sup>3</sup> газу).

Для більшої наочності представлені діаграми структури виробництва електричної енергії в Україні на 2009 р. та на 2016 р., рис. 1.



Станом на 2009 р.



Станом на 2016 р.

Рис. 1. Структури виробництва електричної енергії в Україні

Для реалізації таких амбіційних, але критично важливих планів потрібні висококваліфіковані фахівці в царині енергозбереження та енергоефективності. Саме цю проблему й покликана вирішити ініціатива, щодо втілення в навчальний процес новітньої магістерської спеціальності «Електромобілі та енергозберігаючі технології».

Ще одним вагомим аргументом на користь запропонованої програми є те, що уряд України планує ввести податкові преференції для виробництва електромобілів, а також ініціювати державну програму підтримки покупців електрокарів, рис. 2 [15].



Рис. 2. Пояснення Мінінфраструктури Україна, чому саме електромобілі

Озвучені наступні пропозиції щодо підтримки продажів електромобілів:

1. Зниження вартості на 21,6%:

- скасування ПДВ при ввезенні електромобіля до 1.01.2021 р (-16,8% від вартості автомобіля);
  - звільнення від сплати збору в пенсійний фонд при першій реєстрації електромобіля до 1.01.2021 р. (-4,8% від вартості автомобіля);
  - Звільнення від сплати акцизного збору до 1.01.2021 р. (-109 євро).
2. Додатковий стимул купувати електромобіль, а не автомобіль з ДВЗ:
- податкова знижка для податку на прибуток до 1.01.2021 р. (-20÷30% від вартості автомобіля);
  - державний грант на покупку електромобіля до 1.01.2021 р. (повинен бути визначений окремим рішенням).

Стає очевидним, що електротранспорт – це майбутнє, яке вже настало, і Україна повинна рухатися в цьому загальноєвропейському і загальносвітовому напрямку. Незаперечною складовою успіху в цьому напрямку є наявність висококваліфікованих фахівців, які знають як реалізувати та втілити в життя сучасні енергозберігаючі технології на транспорті.

Наприкінці слід привести аналітичні дані, так аналітичне агентство Bloomberg прогнозує, що споживання бензину і дизеля автомобілями зменшиться на 75 % до 2030 р., рис. 3. Електрокари складатимуть близько 65 % від загального числа транспортних засобів (Лондон і Сінгапур через 15 років). Вартість літій-іонних акумуляторних батарей в 2015 р. знизилася на 65% – до \$ 350 за кВт·год. і, як очікується, до 2025 р. знизиться до \$ 100 за кВт·год [16].

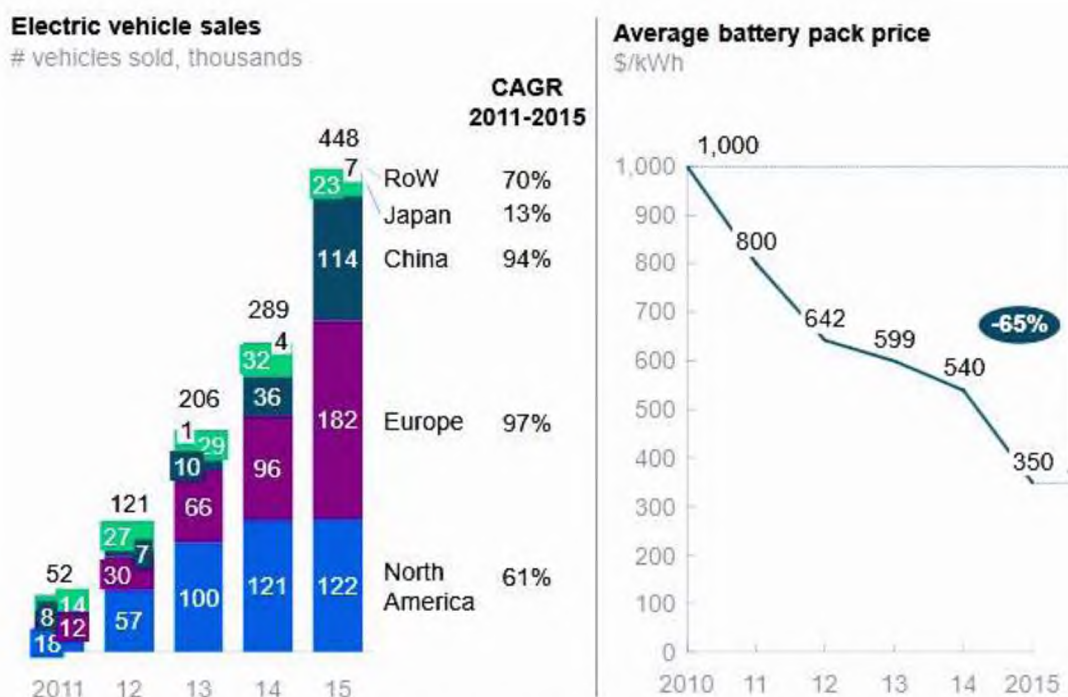


Рис. 3. Bloomberg, зростання продажів електромобілів і зниження цін на батареї

## Література

1. Транспортна інфраструктура / Матеріали сайту - 2016. – Режим доступу: <http://bagrationovsk.gov39.ru/about/transportnaya-infrastruktura>.
2. Гнатов А. В. Энергосберегающие технологии на транспорте / А. В. Гнатов, Щ.В. Аргун, О.А. Ульянец // – Луцьк : Наукові нотатки, В.55. – 2016. – С. 80–86.
3. Постанова КМУ від 1 березня 2010 р. № 243. Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2016 роки.
4. Сталий розвиток // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Сталий\\_розвиток](https://uk.wikipedia.org/wiki/Сталий_розвиток).
5. Сучасні технології на автобусному транспорті. Матеріали IV-ої міжнародної науково-практичної інтернет-конференції [“Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту”] (14-15 квітня 2016 р., м. Вінниця) / А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун, О.В. Підгора. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 139 с. С. 93 – 97.
6. Біла книга з міжкультурного діалогу «Жити разом у рівності й гідності» Рада Європи [Затверджена міністрами закордонних справ країн-членів Ради Європи на 118-й сесії Комітету міністрів Страсбург, 7 травня 2008 року], 2008. – 72 с.
7. Закон України про автомобільний транспорт №3492-IV(3492-15) від 23.02.2006р.
8. Електробус на суперконденсаторах для наземної аеродромної техніки. [Международная научно-техническая конференция «Проблемы создания и обеспечения жизненного цикла авиационной техники»] (20-21 квітня 2016 р., м. Харків) / А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун. – Х.: Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2016. – 162 с. – С. 145 – 147.
9. Міський електробус з надшвидкою зарядкою. [Друга всеукраїнська науково-практична конференція “Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні”: тези доповідей] (17-18 березня 2016 р.). / А.В. Гнатов, О.А. Ульянец Щ.В. Аргун. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 112 с. – С. 43 – 44.
10. Гнатов А. В. Електробус на суперконденсаторах для міських перевезень / А. В. Гнатов, Щ. В. Аргун, О.В. Бикова, О.В. Підгора // Вісник ХНАДУ. – 2016. – № 72. – С. 29–34.
11. «Енергозберігаючі технології на транспорті» - нова спеціальність для підготовки магістрів в умовах сталого розвитку. [Збірка наукових праць всеукраїнської науково-методичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку вищої освіти в Україні»] (22 листопада 2016

- р., м. Харків). / А. В. Гнатов, А.В. Букетов, В.В. Мамрай, А.В. Ільченко, В.В. Біліченко, О.А. Ульянець. – Харків : ХНАДУ, 2016. – 92 с. – С. 24 – 26.
12. Перспективы развития зеленой энергетики в Украине // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://www.biowatt.com.ua/analitika/perspektivy-razvitiya-zelenoj-energetiki-v-ukraine/>.
  13. Розпорядження КМУ від 1 жовтня 2014 р. № 902-р. Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року.
  14. Директива 2009/28/ЄС // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://esco.agency/ru/library/library.html>.
  15. Мининфраструктуры планирует удешевить импортные и выпущенные в Украине электромобили на 21,6% // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://autonews.autoua.net/novosti/15044-mininfrastruktury-planiruet-udeshevit-importnye-i-vypushennye-v-ukraine-elektromobili-na-216.html>.
  16. Електромобили наехали на нефть. Исследование Bloomberg // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://ecotechnica.com.ua/transport/1538-elektromobili-naekhali-na-neft-issledovanie-bloomberg.html>

## Лекція № 9 (2 год)

### Тема 3 Економічний та екологічний вплив електричних АТЗ

## ЕКОЛОГІЧНИЙ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ АТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ І ЙОГО ІНФРАСТРУКТУРА

### 1. Енергозберігаючі технології на транспорті

Останнім часом все більш актуальними стають питання пов'язані із заощадженням електроенергії, енергоефективністю і екологічністю. Особливо гостро вони постають у транспортній галузі, яка є однією з найбільш динамічних і таких, що стрімко розвиваються. Це й не дивно, бо транспорт є однією з найважливіших складових життя сучасної людини. І особливо яскраво це проявляється в великих мегаполісах переповнених усіма можливими видами транспорту, левову частину якого займає мережа громадського транспорту, який повинен мати не тільки належний рівень комфорту, а й відповідати всім сучасним екологічним нормам і вимогам [2, 14, 13]. Наприклад, по Києву щодня курсує більш ніж 500 автобусів, які за день викидають у повітря близько 32 кг вуглецю. Цим повітрям дихають мешканці та гості міста, отже, зі збільшенням кількості транспорту питання його екологічності набуває не аби якої актуальності.

Найбільш перспективним на даний момент видом громадського транспорту в містах є гібридні автобуси і електробуси [2, 12-14]. Зі зростанням їх кількості необхідно розвивати і відповідну інфраструктуру, яка зможе забезпечити надійне та ефективне функціонування даного виду транспорту. На даний момент вже очевидно, що неможливо обійтися без побудови широкої міської та заміської мережі зарядних станцій для електробусів і гібридних автобусів, а також для електромобілів і автомобілів plug-in hybrid [2, 5, 12, 13]. Такі зарядні станції повинні бути обладнані відповідно до норм екологічної безпеки з максимальним застосуванням поновлюваних і альтернативних джерел електроенергії (сонячних батарей, вітрогенераторів тощо) [3, 6, 8].

Все це призвело до створення складної системи під загальною назвою «Розумні дороги», до якої відносяться: інтерактивне освітлення і індикація стану поверхні дороги в залежності від погодних умов; бездротова підзарядка електромобілів під час руху; активна розмітка дороги з можливістю швидкого перерозподілу режимів і смуг руху в залежності від завантаженості доріг тощо. «Розумні дороги» представляють собою складну електротехнічну інформаційну систему здатну до автономної роботи і забезпеченню електричною енергією не тільки себе, але і інших електроспоживачів [11].

### 2. Інфраструктурні енергоефективні технології для транспорту

Ріст і розвиток транспортної системи та її інфраструктури привело до створення абсолютно нового напрямку в розвитку науки і техніки, якому можна дати назву – «Енергозберігаючі технології на транспорті».

Цей напрямок можна розділити на дві основні складові групи: інфраструктура і транспорт. У свою чергу, інфраструктура ділиться на наступні елементи: станції технічного обслуговування; енергоефективні технології та заправні станції. Традиційно автомобільний транспорт можна розділити на: автобусний, вантажний і легковий.

Очевидно, що для функціонування автомобільного транспорту необхідні спеціалізовані станції технічного обслуговування, а для забезпечення функціонування транспорту (в тому числі і електротранспорту) необхідна розвинена мережа заправних станцій. До заправних станцій слід віднести їх структурні схеми, схеми розміщення і принципи побудови, які залежать від умов експлуатації транспорту і його призначення.

Останній елемент, який належить до групи інфраструктура – енергоефективні технології. Це ті технології, які спрямовані на ефективне (раціональне) використання енергетичних ресурсів, тобто використання меншої кількості енергії для забезпечення того ж рівня енергетичного забезпечення необхідних процесів (в транспорті, на виробництві тощо).

Одним з найбільш яскравих прикладів енергоефективних технологій на транспорті в групі інфраструктура є «Розумні дороги» до яких відноситься система «Solar Roadways», винайдена в США Scott та Julie Brusaw [11].

Концепція «Solar Roadways» пропонує перетворити дороги в електростанції, завдяки тому що замінити асфальт сонячними панелями, покритими прозорими матеріалами, що пропускають світло, рис. 1. Протягом світлої частини доби дороги будуть виробляти електрику, отримуючи світло від сонця, а в темний час, накопичена енергія буде забезпечувати функціонування системи.

«Solar Roadways» складається з шестигранних панелей, покритих надміцним склом і начинених сонячними батареями, мікропроцесором, світлодіодами і нагрівальними елементами. Дорожні сонячні панелі здатні витримувати навантаження більше 100 т, що робить їх придатними до використання на будь-яких типах доріг – від велосипедних доріжок до міжрегіональних трас.

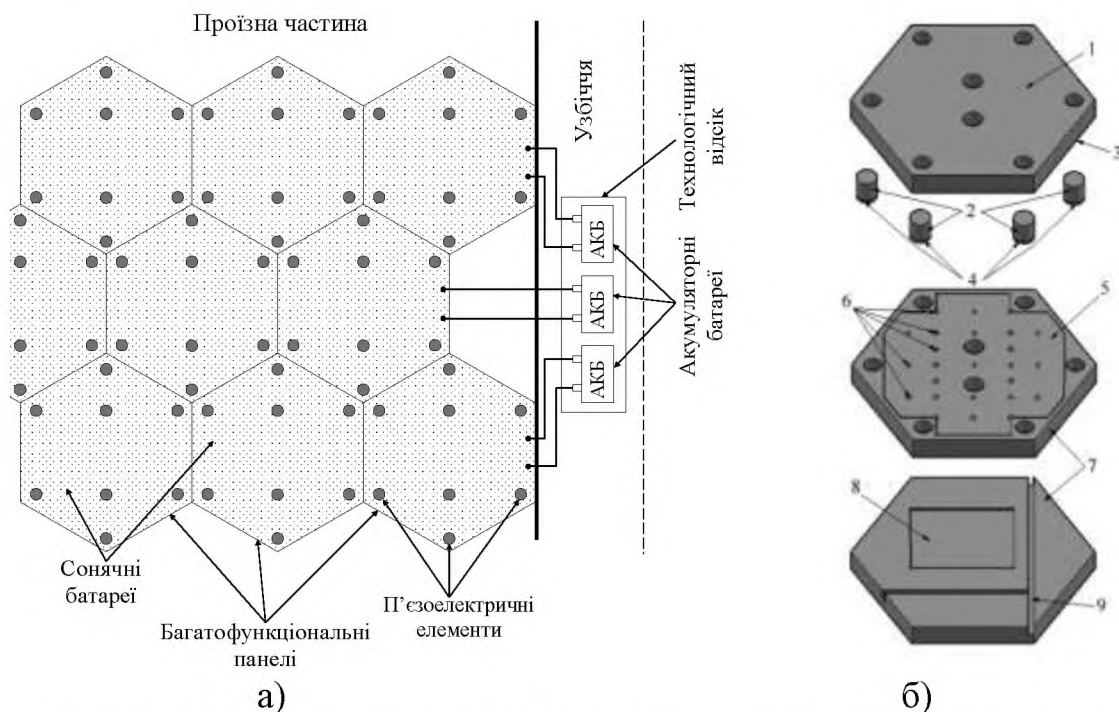


*Рис. 1. Система Solar Roadways*

Дорожнє покриття «Solar Roadways» має наступний функціонал: підсвічування дороги в нічний час (програмовану динамічну світлодіодну розмітку та попереджувальні знаки); підігрів панелей в зимовий час; систему

очищення від масел і антифризів; систему відведення дощової води; фільтрацію і обробку води; систему доставки води для поливу і сільськогосподарських потреб; сигнальну систему, яка попереджає про поломку панелі; зарядку електромобілів від сонячних панелей; захист тварин, дорожню екологію; вироблення електроенергії; попередження про необхідність знизити швидкість в разі, якщо датчики навантаження встановлять появу перешкоди на дорозі. Система «Solar Roadways» передбачає створення вздовж дороги «кабельного коридору», в який можна помістити будь-які типи кабелів, і секції, призначені для збору і очищення зливових вод. На думку розробників, в цілому їх винахід допоможе вирішити проблему використання природних ресурсів, таких як нафта і газ. Також слід зазначити, що Департамент транспорту штату Міссурі в США планує в порядку експерименту замінити ділянку асфальтового покриття на трасі 66 на покриття з вбудованими сонячними батареями «Solar Roadways» [11].

У Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті вченими кафедри автомобільної електроніки запропоновано один з варіантів конструкції панелей «Розумних доріг», рис. 2 (дані розробки захищені патентами України) [17, 18].



1 – верхній прозорий шар панелі; 2 – опора верхнього прозорого шару панелі;  
3 – нагрівальні елементи – дроти електрообігріву; 4 – п'єзоелемент; 5 – сонячна батарея;  
6 – світлодіоди; 7 – підкладки з склотекстоліту; 8 – відсік для електронної плати керування; 9 – жолоб для електричних з'єднань та дротів

Рис. 2. Конструктивне виконання «Розумної дороги»: а – розміщення на дорозі; б - конструкція

### 3. Електротехнології на автомобільного транспорту

Найбільшого поширення серед енергоефективного автотранспорту отримав гібридний і електротранспорт. Оскільки громадський транспорт є доступним, комфортним, екологічним та ефективним, то неможливо переоцінити його значимість для міста в цілому. Основні ж принципи побудови автотранспорту для позначених категорій однакові, тому розглянемо автобусний транспорт.

Автобусний транспорт – це один видів транспорту, що найбільш швидко розвиваються в області енергоефективних технологій, бо особливості його використання змушують його власників (приватні та державні організації) замислитися про скорочення експлуатаційних витрат. Особливо гостро це питання стало після запровадження жорстких екологічних норм, що і стимулювало розвиток гібридних (суміщення двигуна внутрішнього згоряння з електродвигуном) і електротехнологій на різних видах автотранспорту.

Гібридні автобуси дозволяють максимально знизити витрати палива, забезпечуючи мінімальний викид шкідливих речовин в атмосферу [2, 13, 14-16]. Так, гібридна силова установка економить до 60% енергії в порівнянні з традиційними дизельними агрегатами (при цьому зниження споживання палива доходить до 30%), не кажучи вже про зниження шкідливих викидів в атмосферу на 70%. На рис. 3 представлені зображення сучасних гібридних автобусів «Богдан А705», «VITOVТ А-420» і конструкція «Volvo 7700 Hybrid» [7, 10].

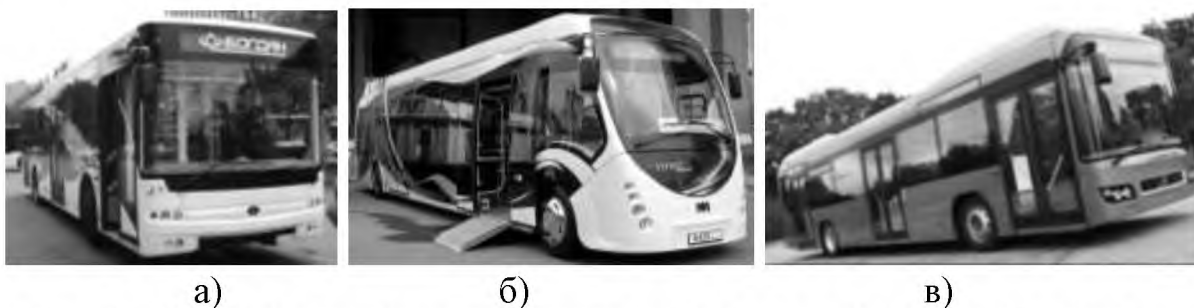


Рис. 3. Гібридні автобуси: а – «Богдан А705»; б – «VITOVТ А-420»; в – «Volvo 7700 Hybrid»

На сьогодні турбування про навколишнє середовище стало вже не тільки трендом, а й необхідністю. Доказом тому є успішність використання електробусів для міських перевезень в розвинених країнах, рис. 4. Найбільшим представником електробусів є компанія BYD Auto з моделлю К9 (Китай), рис. 4,а. Ці електробуси здатні в міському режимі долати 250...300 км шляху без підзарядки. Їх час зарядки становить 3 години на спеціальних терміналах [4].

У Люксембурзі компанія АВВ запустила автоматичні системи швидкої зарядки з автоматичним підключенням на даху [1], де час звичайної зарядки триває 4-6 хв. Систему можна легко інтегрувати в існуючі автобусні лінії,

встановивши швидкі зарядки на кінцевих зупинках, терміналах, депо і(або) на проміжних зупинках.

**Електробус на ультраконденсаторах.** Електробус заряджається від над швидких зарядних установок під час посадки-висадки пасажирів [9, 13-16].

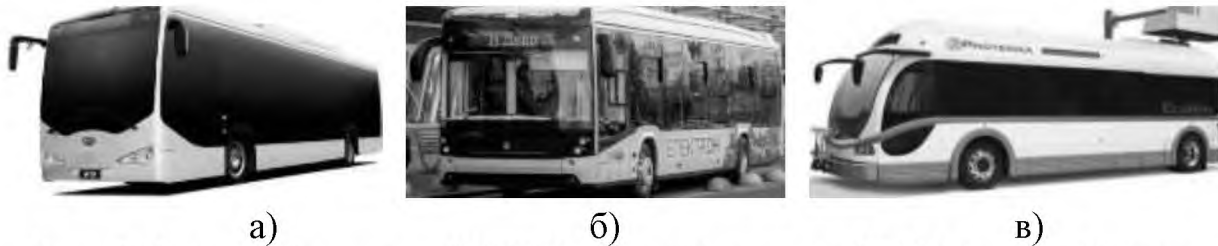


Рис. 4. Електробуси: а – «BYD K9»; б – «Електрон E19101»; в – «Proterra»

Наприклад, у китайському місті Нінбо існує екологічно чистий маршрут громадського транспорту. По ньому пересувається електробус, який отримує порівняно невеликий запас енергії на зупинках під час посадки-висадки пасажирів (приблизно за 10 с), рис. 5.



Рис. 5. Електробус на ультраконденсаторах компанії China South Locomotive & Rolling Stock Corporation

Цікавим є новий тип електробуса компанії Zhuzhou Electric Locomotive, яка запропонувала оснащувати громадський транспорт спеціальними гніздами на даху для швидкої підзарядки. На зупинках уздовж маршруту є кронштейни із штекерами, які вставляються в автобусні роз'єми. Одна така підзарядка забезпечує пробіг до 5 км. Вона працює завдяки ультраконденсаторам, розрахованим на мільйон циклів перезарядки і 12 років служби і має робочі температури від  $-50$  до  $+70$  °C [9].

#### 4. Порівняння різних типів автобусів

Для того, щоб з'ясувати який автобус буде споживати менше палива (або електричної енергії), проведемо порівняння дизельного, гібридного та електричного (на акумуляторах і на ультраконденсаторах) автобусів [13-16].

Для більшої наочності представлення даних, вибрано один маршрут в м. Харкові, (вул. 12-го Квітня – ж/м Горизонт, маршрут № 276е). Довжина шляху в одну сторону складає 4,23 км. Час руху становить 10 хв. Кількість зупинок 7. Слід зазначити, що метою цих розрахунків є надання індикативної інформації щодо витрат на паливо для різних типів автобусів, що дасть змогу провести їх порівняльний аналіз.

В Харкові на цей маршрут виходить дизельний автобус «Богдан» А091, який витрачає палива 20–25 л на 100 км. За один день автобус робить близько 30 поїздок. Ціна 1 л дизельного пального в Україні становить 19,32 грн (середня вартість станом на липень 2016 р.). Витрати на пальне на один день складають приблизно 1200 грн.

Якщо обрати гібридний автобус з дизельним і електричним (потужністю 180 кВт) двигунами, то отримаємо приблизно 40 % економії дизельного палива [2, 7, 10, 13-16]. Отже витрати на обраний маршрут м. Харкова будуть складати приблизно 700 грн. До цього слід додати приблизно 150 грн на заряд накопичувачів енергії гібридного автобуса отже, реально отримаємо 850 грн.

Якщо обрати електробус, який приводиться в рух електричним двигуном потужністю 230 кВт, то експлуатаційні затрати на один робочий день будуть значно менші. Наприклад, Львівський автобус «Електрон Е 19101» який може проїхати без підзарядки до 210 км, а для підзарядки на 70 % потребує усього 15–20 хв, що цілком підходить для цього маршруту.

На автобусі «Електрон Е 19101» стоять Li-Ion акумуляторні батареї ємністю 120 кВт·год. Отже, на один робочий день електробус витратить 120 кВт. Відповідно, на один робочий день буде витрачено приблизно 250 грн на електричну енергію.

Отже, електробус «Електрон Е 19101» є самим економічним, у порівнянні з розглянутими вище автобусами. Але термін служби Li-Ion акумуляторів при такій інтенсивній роботі, становитиме приблизно 5 років, а ресурс самого автобуса 10–12 років. Це є значним недоліком, бо вартість Li-Ion акумуляторів є досить суттєвою. Все це значно послаблює економічні переваги подібних електробусів.

Пропонується обрати електробус, який використовує замість звичайних акумуляторів ультраконденсатори. Термін служби ультраконденсаторів на порядок більший, ніж Li-Ion акумуляторів. Це означає, що ультраконденсатори не вимагають заміни протягом усього терміну експлуатації автобуса [19]. У таблиці 1 представлені порівняльні характеристики різних накопичувачів електроенергії, які свідчать на користь вибору конденсаторного типу накопичувача.

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики різних накопичувачів електроенергії

Тип накопичувача	Акумулятори	
------------------	-------------	--

Показники	Кислотні	Лужні	Літій-іонні	Ультраконденсатори
Питома енергія, Вт·год/кг	20–40	15–80	80–220	2–10
Максимальна питома потужність, Вт/кг	100–300	500–1300	800–3000	1500–12000
Ресурс, цикл	100–400	300–2000	500–2500	>1 млн
Термін служби, років	2–10	2–15	3–10	>20
Робоча температура, °С	-30...45	-40...+60	-30...+60	-50...+70
ККД, %	70–85	65–80	80–95	>90
Обслуговування	Потрібно		Немає	Немає
Ціна, \$/кВт (номінальної потужності)	50–120	75–400	400–670	50–100

Ультраконденсатори характеризуються найвищим ресурсом і терміном служби, найменшою масою, більш широким діапазоном робочих температур і не вимагають обслуговування.

Таким чином, проведений аналіз показує, що найбільш економічними з точки зору експлуатаційних витрат є електробуси на акумуляторах, але висока ціна і малий термін експлуатації Li-Ion акумуляторів може повністю знівелювати їх привабливість. Тому електробус на ультраконденсаторах для категорії міських перевезень виглядає досить привабливо та перспективно, адже при місцевому виробництві такого типу накопичувачів енергії їх собівартість стає в рази меншою за Li-Ion акумулятори, а термін служби перевищує термін служби самих автобусів.

### 5. Модель електробуса на ультраконденсаторах

Пропонується, на базі автобуса малого класу, наприклад, «Богдан А091» зробити електробус у якого, на місці розташування двигуна, буде знаходитися блок ультраконденсаторів (3) з апаратурою управління, рис. 6 [13, 15, 16].

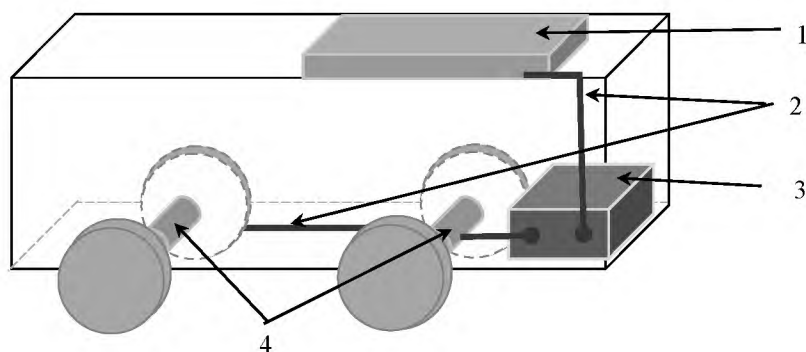


Рис. 6. Структурна схема електробуса на ультраконденсаторах: 1 – зарядний пристрій; 2 – проводка; 3 – блок ультраконденсаторів; 4 – електричні двигуни

Два електричні двигуни (4) розміщуються безпосередньо на осі обертання коліс, як це зображено на рис. 6. Зарядний пристрій розташований на даху електробуса, що дозволить безпечно заряджати ультраконденсатори на зупинках громадського транспорту.

Вибір того чи іншого типу електричної машини для електробуса не може бути проведений у відриві від вибору інших елементів тягового електроприводу. Застосування кожного типу двигунів потребує істотних змін силового перетворювача, механічних елементів (редукторів, гальм), набору первинних вимірювачів (датчиків положення, швидкості і т.п.), а також визначає побудову системи управління.

Згідно з проведеними розрахунками визначаємо технічні вимоги для компонентів електричної силової установки у складі міського автобуса «Богдан А091», табл. 2, 3.

Таблиця 2 – Технічні вимоги для електробуса «Богдан А091»

Найменування	Значення
Номінальна потужність електродвигуна, кВт	60
Максимальна потужність електродвигуна, кВт	120 (два по 60)
Номінальна потужність накопичувача, кВт	90
Енергія накопичувача при номінальній потужності, МДж	більше 1,44
Ресурс, цикл	< 1000 000
ККД в циклі заряд/розряд ( $\eta$ ),	< 0,8
Термін служби, років	10
Максимальний пробіг за рахунок енергії накопичувача, км	до 5

Таблиця 3 – Характеристики міського автобуса «Богдан А091» з електроприводом

Найменування	Значення
Довжина, м	7,2
Повна маса, т	8
Пасажиро місткість, чол.	45
Номінальна потужність тягового електродвигуна, кВт	60
Габаритний обсяг, л	420
Маса, кг	520
Максимальна швидкість, км/год	70
Час розгону до швидкості 50 км/год, с	25
Середня ефективність рекуперації	0,23
Середня питома витрата енергії, Вт·год/(т·км)	80-84
Максимальний пробіг за рахунок енергії накопичувача км	до 5

Розрахований час заряду ультраконденсаторів буде складати від 20-30 с до 5 хв. Цей час визначається потужністю зарядного пристрою. Зарядний пристрій пропонується організувати за схемою, що запропонована компанією АВВ [1], бо вона відповідає всім стандартам, протоколам та нормам безпеки, що пред'являються до громадського транспорту в країнах ЄС.

Проведено аналіз нового напрямку «Енергозберігаючі технології на транспорті» з розкриттям його основних елементів. Запропоновано конструкцію «Розумній дороги», як складового елементу інфраструктури, яка складається з функціональних плит дорожнього покриття. Проведено порівняльний аналіз експлуатаційних витрат для автобусів різних видів, але одного класу. Для цього обрано конкретний маршрут м. Харкова протяжністю 4,23 км в одну сторону. Показано, що за даним показником електробуси мають явні переваги. Запропоновано в якості автобуса малого класу в міських умовах експлуатації використовувати електробус на ультраконденсаторах. Визначено технічні вимоги для компонентів електричної силової установки в складі міського електробуса на ультраконденсаторах.

### Література

1. АВВ launches fast charging robot for public buses // Матеріали сайту – 2016.  
– Режим доступу:  
<http://www.abb.com/cawp/seitp202/bc2c3a332d7a35c5c1257ee3002d9a19.aspx>.
2. Бажинов О. В. Гібридні автомобілі: [монографія] / [О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков та ін.]; Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Х.: Крок, 2008. – 327 с.

3. Bellekom S. et al. Electric cars and wind energy: Two problems, one solution? A study to combine wind energy and electric cars in 2020 in The Netherlands //Energy. – 2012. – Т. 45. – №. 1. – С. 859-866.
4. BYD Electric Car // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [http://evsroll.com/BYD\\_Electric\\_Car.html](http://evsroll.com/BYD_Electric_Car.html).
5. Clean Energy Ministerial; Electric vehicles initiative; International Energy Agency. Global EV Outlook: Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020; OECD/IEA: Paris, France, 2013.
6. Etezadi-Amoli M. Rapid-charge electric-vehicle stations / M. Etezadi-Amoli, K. Choma, J. Stefani – IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, № 3. – 2010. – с. 1883–1887.
7. Exhibition "ЕлектроTrans 2012" // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://www.metromost.com/?p=2248>.
8. Singh M., Kumar P., Kar I. A model of electric vehicle charging station compatibles with vehicle to grid scenario // Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International. – IEEE, 2012. – С. 1-7.
9. The world's fastest charging electrobus powers up in 10 seconds flat. // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://inhabitat.com/the-worlds-fastest-charging-electric-bus-powers-up-in-10-seconds-flat>.
10. Volvo 7700 Hybrid // Матеріали сайту – 2008. – Режим доступу: <http://www.omnibusarchiv.de/include.php?contentid=426&mode=print&path=content>.
11. Welcome to Solar Roadways. // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://www.solarroadways.com>.
12. Xiaogang Wu. Energy Flow Chart-Based Energy Efficiency Analysis of a Range-Extended Electric Bus / Wu Xiaogang, Hu Chen, Chen Jingfu, – Mathematical Problems in Engineering. – 2014. – Article ID 972139, 12 с. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/972139>.
13. Гнатів А. В., Аргун Ш. В., Підгора О. В. Сучасні технології на автобусному транспорті. Матеріали IV-ої міжнародної науково-практичної інтернет-конференції [“Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту”] (14-15 квітня 2016 р., м. Вінниця). Вінниця, ВНТУ, 2016, 139 с., С. 93–97.
14. Гнатів А. В. Енергозберігаючі технології на транспорті / А. В. Гнатів, Ш. В. Аргун, О. А. Ульянець. – Луцьк : Наукові нотатки, В.55. – 2016. – С. 80–86.
15. Гнатів А. В., Ульянець О. А., Аргун Ш. В. Міський електробус з надшвидкою зарядкою. [Друга всеукраїнська науково-практична конференція «Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні»: тези доповідей] (17-18 березня 2016 р.). Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 112 с. – С. 43 – 44.
16. Електробус на суперконденсаторах для наземної аеродромної техніки. [Международная научно-техническая конференция «Проблемы создания и

- обеспечения жизненного цикла авиационной техники»] (20-21 квітня 2016 р., м. Харків) / *А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун.* – Х.: Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2016. – 162 с. – С. 145 – 147.
17. Пат. 106587 України, Н02К 7/00, Н02К 7/12, Н02К 35/00, Н02К 35/02 Пристрій генерування електричної енергії / *Гнатов А. В., Аргун Щ.В., Гнатова Г. А.*; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун.-т., Гнатов А.В. – № у 2015 11853 заявл. 30.11.2015; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8.
18. Пат. 106588 України, Н02К 7/12, Н02К 35/02 Спосіб генерування електричної енергії від кроків людського потоку / *Гнатов А. В., Аргун Щ.В., Гнатова Г. А.*; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун.-т., Гнатов А.В. – № у 2015 11854 заявл. 30.11.2015; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8.
19. Экономичный экологичный гибридный городской автобус. // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/40498/doc/44113>.

## Лекція № 10 (2 год)

### Тема 4 Тяговий електродвигун для електричних АТЗ

#### 1. Електродвигун-генератор

Умовно в електромобілі можна виділити 3 основні складові елементи (системи): джерело енергії, рухова (силова) і допоміжна системи.

У цій лекції ми будемо говорити про один з важливих елементів рухової системи, а саме про тягові електродвигуни. Ми розглянемо їх різновиди та особливості експлуатації. Розглянемо специфіку роботи електродвигуна в гібридних автомобілях. Звичайно ж, торкнемося принципу роботи електродвигуна.

Рухова система – це серце електромобіля, а електродвигун розташований прямо в центрі системи. Електродвигун перетворює електричну енергію, що отримується від батареї, в механічну енергію, яка дозволяє автотранспортному засобу рухатися. Він також працює як генератор під час рекуперативного гальмування, яке відправляє енергію назад в джерело.

Але не все так просто як здається. Якщо хоча б, враховувати той факт, що на відміну від ДВС, у електричного двигуна практично 90-95% енергії, що виділяється йде на створення крутного моменту. Погодьтеся, що подібну потужність необхідно приборкати і вміти з нею поводитися, а для цього потрібно знати деякі нюанси про роботу і різновидах електричних двигунів.

Якщо порівнювати електродвигуни з ДВЗ, то відразу потрібно відзначити ряд їх суттєвих переваг:

1) Електродвигун складається з \_\_\_ рухомих деталей, тоді як ДВЗ з \_\_\_\_\_. Це безпосередньо вказує на високу надійність електродвигуна в порівнянні з ДВЗ.

2) Крутний момент мотора досягає свого максимуму відразу при включенні, таким чином, електромобілі не вимагають наявності характерних для ДВЗ стартерів і коробки передач.

3) Робота електродвигуна на різних оборотах (від 0 до 18000 об/хв) з високим ККД, дозволяє електромобілю обходитися без коробки перемикачів передач. Для реверсу двигуна, тобто включення заднього ходу, досить поміняти полярності (для двигунів постійного струму) або чергування фаз (для двигунів змінного струму).

4) Питомі енергетичні параметри електродвигуна на порядок вищі, ніж у ДВЗ.

Однак необхідно розуміти, що стартувати на електромобілі з усього потенціалу крутного моменту, який потужніший ніж на багатьох автомобілях з ДВЗ небезпечно, і це тягне неефективні витрати заряду батареї.

Електродвигуни можна класифікувати за типом струму:

- двигуни змінного струму;
- двигуни постійного струму;
- комбіновані двигуни.

Двигуни постійного струму використовувалися в перших моделях електромобілів.

Потім двигуни змінного струму почали набирати все більшої популярності в сфері електроавтотранспорту. Це сталося завдяки ряду їх переваг, таких як: кращі показники питомої потужності, більш високий ККД, менші масогабаритні показники, відсутність щітково-колекторного вузла. Особливо цьому сприяла поява надійних тиристорних і транзисторних перетворювачів.

Саме тому в сучасних електромобілях найбільш часто використовують електродвигуни змінного струму. Їх можна розділити на три типи – це асинхронні двигуни (АД), синхронні двигуни і мотор-колеса.

## 2. Асинхронні двигуни в електромобілі

Почнемо розгляд з АД:

1) Асинхронні двигуни (АД). Це двигуни змінного струму. У них швидкість обертання ротора відрізняється від швидкості обертання магнітного поля статора або синхронної кутової швидкості двигуна. Вона відстає на величину, яку називають ковзанням.

$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  – ковзання двигуна;

$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60}$  – синхронна кутова швидкість двигуна (кутова швидкість обертання магнітного поля статора);  $n_0$  – синхронна швидкість обертання двигуна (швидкість обертання магнітного поля статора);

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p};$$

де  $f_1$  – частота мережі;

$p$  - число пар полюсів двигуна.

За кількістю фаз розрізняють одно-, дво- і трифазні агрегати АД.

Давайте розглянемо принцип дії електродвигуна на прикладі асинхронного трьохфазного електродвигуна, тому що саме такі застосовуються в якості тягових електродвигунів в електромобілях.

Як вже говорилося раніше, електродвигун трьохфазного струму живиться трифазним змінним струмом.

Нерухома частина машини називається статором, рухома частина – ротором.

Сердечники статора і ротора асинхронних машин збираються (шихтуються) з окремих листів електротехнічної сталі (рис. 2.2).



рис. 2.2

На внутрішній поверхні статора і на зовнішній поверхні ротора є пази, в яких розміщуються провідники обмоток. Обмотка статора виконується трьохфазною, під'єднується до мережі трьохфазного струму і називається первинною обмоткою.

Обмотка ротора може бути виконана трьохфазною, аналогічно обмотці статора. Кінець фази такої обмотки ротора з'єднується зазвичай в «зірку», або ще може бути у трикутник, а початок з допомогою контактних кілець і металлографітної щітки виводиться назовні. Така асинхронна машина називається машиною з фазним ротором. До контактних кілець зазвичай приєднується трьохфазний пусковий або регулювальний реостат. Фазна обмотка ротора виконується з тим же числом полюсів, як і статорна обмотка.

Інший різновид обмотки ротора – обмотка у вигляді білячої клітки (рис.2.3). Кінці стрижнів такої обмотки з обох торців з'єднані накоротко кільцями, тому обмотка виводів не має. Така асинхронна машина називається машиною з короткозамкненим ротором. В машинах потужністю до 100 кВт обмотка ротора виконується шляхом заливання алюмінієм. У більших машинах застосовується мідна зварна обмотка. Відсутність ковзаючого контакту на роторі забезпечує високу надійність роботи такого двигуна, а простота технології виготовлення – дешевизну. З цих причин асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором знаходять широке застосування в різних галузях в тому числі і в транспорті.

**Принцип дії асинхронної машини** При живленні обмотки статора трьохфазним струмом з частотою  $f_1$  створюється магнітний потік  $\Phi_1$ , що обертається з частотою:

$$n_1 = 60 f_1 / p, \quad (2.1)$$

де  $p$  – число пар полюсів обмотки статора.

Частота обертання магнітного поля  $n_1$  називається синхронною.

Магнітний потік, що обертається  $\Phi_1$  індукуює ЕРС в обмотці ротора. Оскільки обмотка ротора замкнута, то виникає система струмів ротора і створюється потік ротора  $\Phi_2$ , що обертається. В результаті взаємодії нерухомих одна відносно іншої потоків статора і ротора утворюється результуючий потік  $\Phi$ . Взаємодія потоку  $\Phi$  і

струму ротора призводить до виникнення електромагнітних сил і електромагнітного моменту.

У режимі двигуна під дією цього моменту ротор обертається в бік обертання магнітного поля. У режимі генератора (наприклад, при гальмуванні електромобіля) ротор обертається за допомогою привідного двигуна (приводного двигателя) зі швидкістю  $n > n_1$ , при цьому ЕРС обмотки статора перевищує напругу мережі, і машина віддає енергію в мережу, тобто починає заряджати тягову акумуляторну батарею.

Частота обертання  $n$  ротора асинхронної машини завжди відмінна від частоти обертання магнітного поля  $n_1$ , яку називають синхронної. Звідси походить назва машини – асинхронна, тобто несинхронна, в якій  $n \neq n_1$ .

### 3. Синхронні двигуни в електромобілі

2) Синхронні двигуни. Такі електродвигуни також працюють на змінному струмі. Але, на відміну від асинхронних, у них рух ротора повністю симетричний відносно електромагнітного поля. Подібні електродвигуни використовують при підвищених потужностях.

Статор синхронної машини (СМ) називається якорем. На статорі розташована трьохфазна обмотка, рівномірно розподілена по пазах (обмотка якоря). Число полюсів обмотки статора дорівнює числу полюсів ротора.

Ротор СМ називається індуктором і має обмотку збудження, що живиться постійним струмом. Підведення струму здійснюється через два контактних кільця і щітки. Машини малої потужності можуть мати збудження від постійних магнітів. За конструкцією ротори бувають явнополюсні і неявнополюсні СМ (рис.3.1)

Перевага СД в порівнянні з АД полягає в можливості точного регулювання електродвигуна для застосування в автомобілі. Також СД мають більш високий коефіцієнт потужності, а отже і більш високий ККД, який більше ніж у АД на 0,5-3%.

### 4. Мотор-колесо в електромобілі

В даному типі двигуна сила напруги і крутний момент розраховані на конкретне колесо. Мотор-колесо часто використовується в плагін-гібридних автомобілях в робочому тандемі з ДВЗ.

Мотор-колесо являє собою безконтактний електродвигун, у якому обертається не ротор, а статор. Статор є і ободом колеса.

Відмінні риси мотор-колеса:

- безредукторний вентиляційний електродвигун вбудований в ступицю колеса, *рис. 7.13*;
- постійні магніти на основі рідких металів;
- високий питомий момент;
- застосування композиційних матеріалів і сплавів.



Рис. 7.13

Отже, переваги мотор-колеса полягають у наступному.

**По-перше**, відсутність редукторного вузла обумовлює високу надійність і, отже, більший строк експлуатації.

**По-друге**, керована швидкість обертання мотор-колеса, що досягається за допомогою системи керування.

**По-третє** підвищену плавність ходу за рахунок того, що відсутність редуктора дозволяє обертатися двигуну з дуже високою точністю.

Нарешті, у даного електропривода за рахунок застосування нових матеріалів практично абсолютно безшумна робота.

Конструкція мотор-колеса дозволяє його встановлювати безпосередньо в саме колесо. Але в сучасних електромобілях відходять від такого розташування мотора, оскільки це збільшує питому вагу шасі, збільшує безпружинні (неподрессоренные) маси автомобіля і знижує керованість машиною. Також, погані дороги сприяють руйнуванню, як постійних магнітів на статорі, так і елементів підвіски автомобіля, яка має більшу вагу в порівнянні зі звичайною конструкцією.

Більш раціонально, замість мотор-колеса, використовувати електродвигун в якості повноцінного приводу для обертання колеса. Хоча, в деяких конструкціях електричних транспортних засобів, виправдане використання мотор-коліс. Наприклад, сигвей, моноколесо, електровелосипеди і т.д.

Гібридні автомобілі мають власну специфіку використання електродвигунів. В основному електродвигун гібрида виконує роль допоміжного елемента. Він підвищує потужність основного двигуна внутрішнього згорання і знижує рівень споживання палива.

Давайте розглянемо деякі різновиди «функцій» електродвигунів, які використовуються в гібридах:

1) *Вбудована допомога мотору*. Електродвигун бере на себе частину зусиль зі створення крутного моменту при русі.

2) *Вбудований генератор стартера.* В даному випадку, електродвигун, тільки приводить автомобіль в рух.

3) *Старт/стоп двигун.* Система електродвигуна, яка відключає основний ДВЗ при зупинці і миттєво запускає його при початку руху.

На цьому ми завершуємо лекцію по електродвигунам . Сьогодні ми розібрали як класифікують двигуни. Їх особливості експлуатації переваги та недоліки. Розібрали принцип роботи на прикладі асинхронного трьохфазного двигуна. Також ми розглянули специфіку роботи електродвигуна в тандемі з ДВЗ в гібридах.

Як бачите, лекція дуже інформативна і важлива. Для того, щоб краще засвоїти матеріал, я рекомендую переглянути її хоча б ще раз.

1. Асинхронні двигуни із зовнішнім ротором.
2. Лінійні асинхронні двигуни.

### 1. АСИНХРОННІ ДВИГУНИ ІЗ ЗОВНІШНІМ РОТОРОМ

Крім асинхронних двигунів загального призначення, що становлять основу сучасного електропривода, в останні роки усе більш широке застосування отримують асинхронні двигуни спеціального призначення. Застосування таких двигунів дозволяє спростити електропривод і додати йому деякі специфічні властивості, які двигунами загального призначення не забезпечуються. Для двигунів спеціального призначення характерна нетрадиційність їх конструкцій. До таких двигунів відносяться двигуни із зовнішнім ротором і лінійні асинхронні двигуни.

**Асинхронні двигуни із зовнішнім ротором.** Ці двигуни відрізняються від раніше розглянутих тим, що їх статор (нерухлива частина) перебуває усередині ротора (обертової частини). Таку конструкцію іноді називають *зверненою*. За принципом дії ці двигуни не відрізняються від асинхронних двигунів загального призначення, тобто від двигунів із внутрішнім ротором.

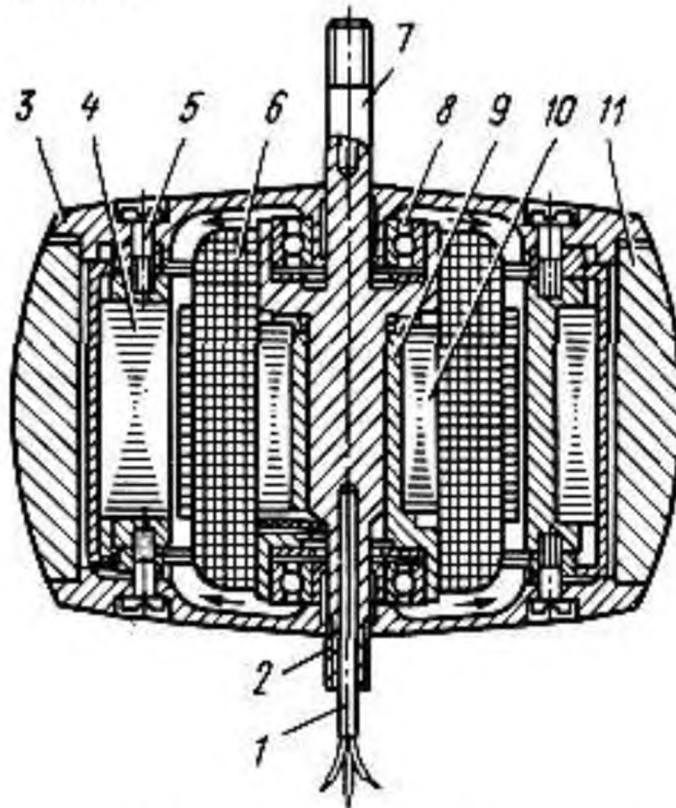


Рис. 11.1. Обладнання трифазного асинхронного двигуна із зовнішнім ротором

Асинхронний двигун із зовнішнім ротором (рис. 11.1) складається із шихтованого сердечника статора 10, зібраного на втулці 9, яку напресовано на сталеву необертову вісь 7. Трифазна обмотка статора 6 має три виводи 1, які проходять через порожню частину 2 осі 7. Зовнішній ротор складається із шихтованого сердечника 4, у пазах якого розташовані стрижні обмотки, замкнені із двох сторін замикаючими кільцями. Зовнішня поверхня ротора утворена ободом 11, форма якого залежить від призначення двигуна,

тобто він може бути колесом, шківом, роликом або просто масивним елементом – маховиком. Із двох сторін обід закріплені кришками 3 за допомогою гвинтів 5. Кришки 3 зчленовуються з підшипниками 8.

Асинхронні двигуни із зовнішнім ротором застосовують в електроінструменті, у рольгангу на металургійних підприємствах (зовнішній ротор двигуна – це обертовий ролик рольганга), у якості двигуна-маховика для приводу обладнань, що вимагають рівномірного обертання при нерівномірному навантаженні на вал.

Однак найширше застосування ці двигуни одержали в гіроскопічних приладах у якості *гіродвигунів*. Гіроскопічні прилади становлять основу навігаційної техніки в суднобудуванні, авіації та ракетобудуванні. Основний елемент гіроскопічного приладу – гіроскоп, тобто масивний циліндричний ротор. Наведений у швидке обертання, цей ротор зберігає незмінним положення в просторі своєї осі обертання. Чим більше частота обертання ротора, тим ефективніше проявляється ця властивість.

Основна вимога до гіродвигуна полягає в створенні великого кінетичного моменту,  $\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ :

$$M_{\text{кін}} = J_2 \omega_2, \quad (11.1)$$

де  $J_2$  – момент інерції ротора,  $\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$ ;  $\omega_2$  – кутова швидкість ротора,  $1/\text{с}$ .

Гіродвигуни для забезпечення великого моменту інерції  $J$  виготовляють з зовнішнім ротором, а для одержання великої кутової швидкості  $\omega_2$  їх живлять від мережі змінного струму частотою  $f_1 = 400 \div 2000$  Гц при числі полюсів обмотки статора  $2p = 4$  або 8. Обмотку ротора гіродвигунів виконують із малим активним опором, що визначає роботу двигуна з невеликим ковзанням ( $s = 0,02 \div 0,05$ ). Це необхідно для одержання твердої механічної характеристики, тобто можливі коливання живлячої напруги і навантаження не будуть супроводжуватися значними змінами частоти обертання ротора.

## 2. ЛІНІЙНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНИ

У багатьох виробничих механізмах, транспортних засобах і приладних обладнаннях робочий орган робить поступальний або зворотно-поступальний рух. Для приводу цих обладнань і механізмів використовують двигуни з обертовим рухом ротора і проміжною кінематичною ланкою для перетворення обертового руху в лінійне. Така ланка ускладнює привід, викликає додаткові втрати потужності, знижує ККД і надійність. Кінематика приводу зазначених обладнань спрощується, якщо використовувати лінійний електродвигун, у якого рухлива частина робить поступальний або зворотно-поступальний рух. Найбільше застосування одержали лінійні асинхронні двигуни (ЛАД).

Принцип дії ЛАД заснований на здатності багатофазної (трифазної) системи струмів створювати магнітне поле, що біжить. Якщо у звичайному асинхронному двигуні статор циліндричної форми розрізати уздовж його осі та розгорнути в площину (рис. 11.2), то одержимо статор лінійного двигуна, що називається індуктором 1. Якщо обмотку індуктора з'єднати зіркою або трикутником і включити в трифазну мережу, то виникає магнітне поле, вісь якого буде переміщатися уздовж розгорнутої поверхні сердечника індуктора із синхронною швидкістю  $\omega_1$ . Таке магнітне поле називають, що біжить.

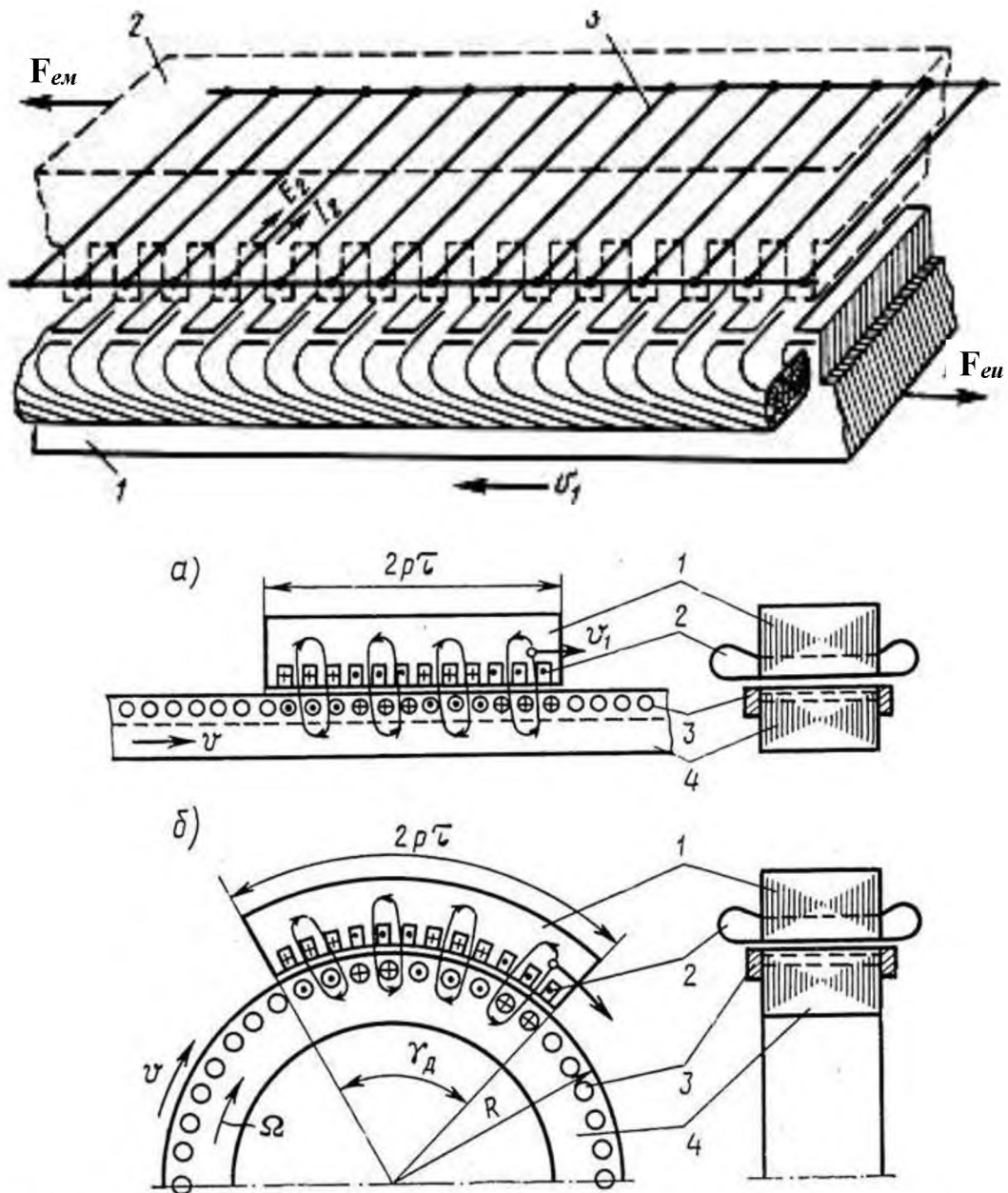


Рис. 11.2. Електромагнітна схема: а - лінійного асинхронного двигуна; б – звичайного асинхронного двигуна

Синхронна швидкість поля, що біжить, пропорційна частоті струму  $f_1$  і довжині індуктора  $L_u$  та зворотно пропорційна числу пар полюсів в обмотці індуктора  $p$ :

$$v_1 = \frac{f_1 L_u}{p}. \quad (11.2)$$

Поблизу індуктора, паралельно йому, розташовано вторинний елемент, що складається з магнітопроводу 2 (на рис. 11.2 показано пунктирними лініями), у пази якого закладені алюмінієві або мідні стрижні 3 короткозамкненої обмотки. Поле, що біжить, індуктора, зчіплюючись зі стрижнями 3 короткозамкненої обмотки, буде наводити в них ЕРС  $E_2$ , яка створить струми  $I_2$ . Взаємодіючи з магнітним полем, що біжить, ці струми створюють електромагнітні сили, що прагнуть змістити магнітопроводи індуктора і вторинного елемента відносно один одного в протилежних напрямках. Якщо один з магнітопроводів, наприклад індуктора, закріпити нерухомо, то інший магнітопровід, називаний у цьому випадку бігунком, буде лінійно переміщатися

щодо першого в напрямку руху, поля що біжить. У підсумку електроенергія, що надходить в обмотку індуктора з мережі, буде перетворюватися в механічну енергію лінійного (поступального) руху.

Якщо нерухливим зробити вторинний елемент, то бігунком стане індуктор, який буде переміщатися лінійно в напрямку, протилежному руху створюваного їм поля, що біжить.

Електромагнітна сила, що викликає лінійне переміщення бігунка лінійного двигуна, прямо пропорційна числу пар полюсів обмотки індуктора  $p$ , струму вторинного елемента  $I_2$  і магнітному полю, що біжить,  $\Phi_2$ :

$$F_{em} = c_m p I_2 \Phi_2 \cos \psi_2, \quad (11.3)$$

де  $c_m$  – постійний коефіцієнт, обумовлений конструкцією лінійного двигуна;  $\psi_2$  – кут зрушення фаз між ЕРС  $\dot{E}_2$  і струмом  $\dot{I}_2$  у вторинному елементі двигуна.

Швидкість руху бігунка  $v_2$  завжди менша від швидкості поля, що біжить, тому що тільки в цьому випадку в обмотці вторинного елемента ЛАД наводиться ЕРС. Таким чином, у ЛАД, так само як і у двигунах з обертовим рухом ротора, ковзання  $s$  характеризує відставання рухливої частини двигуна від поля, що біжить:

$$s = \frac{v_1 - v_2}{v_1}. \quad (11.4)$$

Є конструкції ЛАД, у яких в якості вторинного елемента використовується смуга з міді, алюмінію або сталі, що має феромагнітні властивості. Можливе застосування складеного вторинного елемента, наприклад смуги з феромагнітної сталі, покритої шаром міді.

Лінійні асинхронні двигуни використовують для приводу заслінок, підйомно-транспортних засобів, металообробних верстатів, в електроприводі маніпуляторів (роботів) і в багатьох інших випадках, де робочий орган повинен робити поступальний або зворотно-поступальний рух. Розглянемо декілька прикладів практичного застосування ЛАД. На рис. 11.3, а показано обладнання приводу візка мостового крану з ЛАД. На візку 3 розташовано індуктор лінійного двигуна, що складається із шихтованого сердечника 6, у пазах якого розташовано обмотку 5. Напрямна для коліс 2 являє собою сталеву балку 1, до нижньої частини якої прикріплена сталева смуга 4 – вторинний елемент ЛАД.

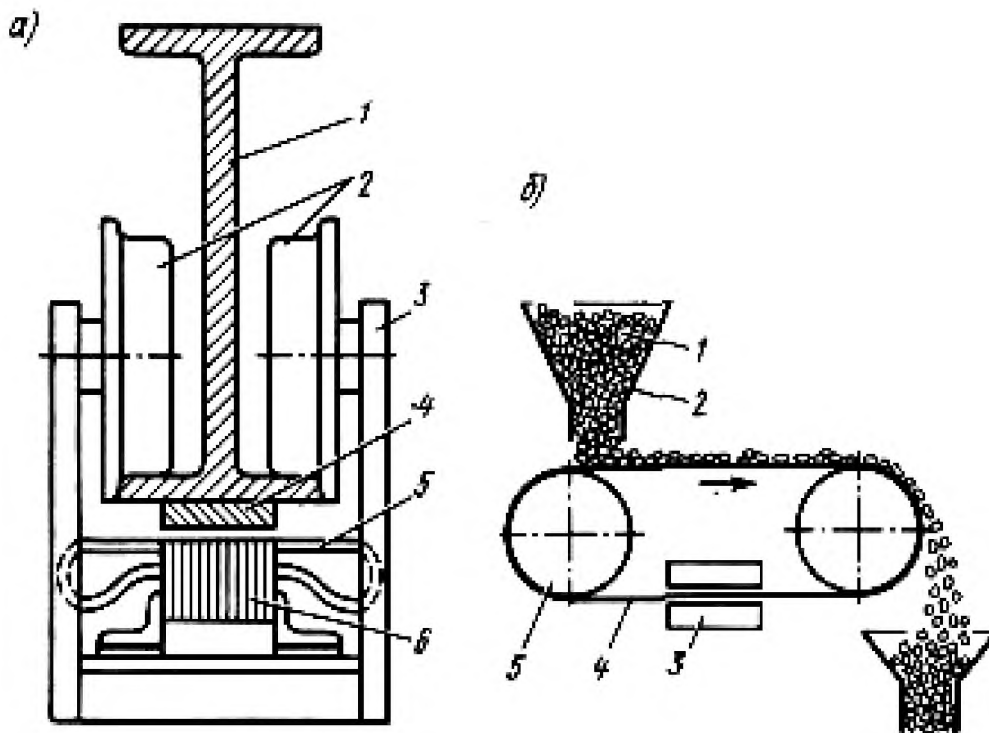


Рис. 11.3. Лінійні асинхронні двигуни для приводу візка мостового крану (а) і стрічки транспортера (б)

На рис. 11.3, б показано приклад застосування ЛАД для приводу стрічкового конвеєра, що транспортує сипучі матеріали 1 з бункера 2. Вантаж переноситься металевою стрічкою 4, укріпленою на обертових барабанах 5. Металева стрічка – вторинний елемент ЛАД. Електромагнітне зусилля, що приводить стрічку в рух, виникає на ділянці стрічки, що проходить у повітряному зазорі між двома індукторами 3.

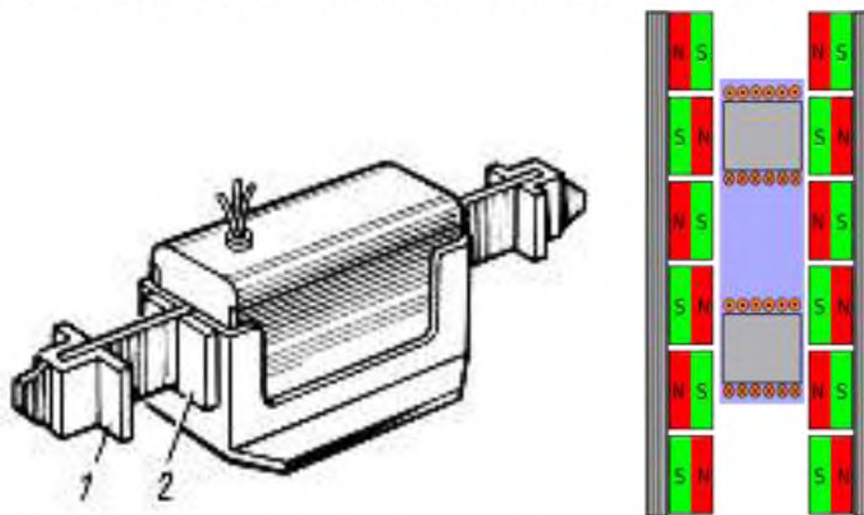


Рис. 11.4. Лінійний асинхронний двигун зворотно-поступального руху

У ЛАД зі зворотно-поступальним рухом, які набули найбільшого застосування для приводу виробничих механізмів і верстатів, змінюється напрямок поля, що біжить, індуктора в момент закінчення руху бігунка в одному з напрямків. Для цього необхідно змінювати порядок чергування фаз живлячої напруги. Для гальмування бігунка наприкінці ходу застосовують обмежувальні пластини на бігунку 1 і індукторі 2 (рис. 14.4). Іноді між цими пластинами розташовують пружини.

Приклади використання лінійних двигунів у металообробних верстатах – привід стола плоскошліфувального верстата або привід стола поздовжньо-стругального верстата.

Недоліки лінійних асинхронних двигунів: явище крайового ефекту, труднощі збільшення електромагнітного зусилля, створюваного двигуном. Явище крайового ефекту являє собою комплекс електромагнітних процесів, обумовлених розімкнутою конструкцією статора (індуктора). Небажані наслідки крайового ефекту – поява "паразитних" гальмівних зусиль, спрямованих зустрічно руху рухливої частини двигуна; виникнення поперечних сил, що прагнуть змістити рухливу частину двигуна в поперечному напрямку. Крайовий ефект викликає ряд інших небажаних явищ, що погіршують робочі характеристики лінійних двигунів. У двигунах з обертовим рухом ротора електромагнітний момент, що розвивається двигуном, підсилюється застосуванням редуктора, що знижує частоту обертання. У ЛАД збільшення сили, що діє на робочий орган машини, можливо лише за допомогою важеля (системи важелів), з більшим плечем на стороні двигуна. Однак це ускладнює привід і позбавляє його головної переваги, яка досягається заміною двигуна з обертовим рухом ротора на лінійний двигун.

У лінійних двигунах зворотно-поступального руху виникають несприятливі умови роботи, викликані чергуванням циклів розгону на початку руху бігунка і гальмування наприкінці його руху. Тому доцільно регулювати швидкість, змінюючи частоту живлячої напруги  $f_1$ . Застосовувані для цього регулятори частоти повинні забезпечувати оптимальний закон зміни частоти, відповідний до мінімальних втрат у перехідних режимах розгону та гальмування.

## Лекція № 12 (2год.)

### Тема 4 Тяговий електродвигун для електричних АТЗ

1. Мотор-колесо.
2. Маточиний асинхронний тяговий двигун із зовнішнім ротором для приводу мотор-колеса.
3. Синхронний тяговий двигун зі збудженням від постійних магнітів.
4. Безконтактний двигун постійного струму.

#### 1. МОТОР-КОЛЕСО



Рис. 1 - Схема безредукторного двигуна для автотранспорту

Мотор-колесо являє собою безконтактний електродвигун, у якому обертається не ротор, а статор. Статор є і ободом колеса.

Високий ККД - характерна ознака такого низькооборотного, але високомоментного двигуна.

Відмінні риси мотор-колеса:

- Безредукторний вентильний електродвигун вбудований в ступицю колеса;
- Високоерцитивні постійні магніти на основі рідких металів;
- Високий питомий момент;
- Застосування композиційних матеріалів і сплавів.

Отже, переваги мотор-колеса полягають у наступному. По-перше, відсутність редукторного вузла обумовлює високу надійність і, отже, більший строк експлуатації. По-друге, керована швидкість обертання мотор-колеса, що досягається за допомогою програмувального мікропроцесора або персонального комп'ютера, керує швидкістю і напрямком. По-третє підвищену плавність ходу за рахунок того, що відсутність редуктора дозволяє обертатися двигуну без дискретного кроку з дуже високою точністю. Нарешті, у даного електропривода за рахунок застосування нових матеріалів практично абсо-

лютно безшумна робота.

## 2. МАТОЧИНИЙ АСИНХРОННИЙ ТЯГОВИЙ ДВИГУН ІЗ ЗОВНІШНІМ РОТОРОМ ДЛЯ ПРИВОДУ МОТОР-КОЛЕСА

Обладнання даного типу двигуна можна розглянути на прикладі, тягового приводу, який використовується в трамваї з низьким рівнем підлоги, що вироблені німецькою компанією ABB Henschel (нині входить до складу Bombardier).

Даний привід базується на трифазному асинхронному двигуні із зовнішнім ротором і рідинним охолодженням, який приводить в обертання одне колесо (рис. 2)



Рисунок 2 - Загальний вигляд маточиноного приводу з гальмовим диском

Концепція приводу характеризується тим, що частота обертання ротора тягового двигуна дорівнює частоті обертання колеса. Завдяки цьому відпадає необхідність у редукторі. Така конструкція забезпечує знижений рівень шуму та значно менші експлуатаційні витрати в порівнянні із класичним приводом.

### **Конструкція**

Статор у маточинному асинхронному тяговому двигуні розташовано усередині. Статор складається з наступних елементів (рис. 3):

- нерухливого порожнього вала із трубою, що утворює сорочку охолодження (7);
- шихтованого магнітопроводу зі стягуючими кільцями (6);
- статорної обмотки із з'єднувачами, струмоподами та штекерним розніманням для підключення (5, 8);
- елементів ущільнення осьового підшипника.

Через порожній вал двигуна з привареною до нього трубою охолодження рідина подається до нерухливих частин тягового двигуна. Магнітопровід на гвинтах кріпиться до труби охолодження і за допомогою двох кілець фіксується в поздовжньому напрямку. Обмотку статора з ізоляцією класу 200 розміщено в пазах магнітопроводу і струмоподами з'єднана зі штекерним розємом.

Конструкцію ротора утворюють:

- труба корпусу з пазами для обмотки (1);
- стрижні та короткозамкнені кільця обмотки, (3);
- обертові підшипникові щити (4).

Труба корпусу, виконана з поліпшеної сталі, має внутрішні пази, у яких розташовані стрижні, що утворюють короткозамкнену обмотку.

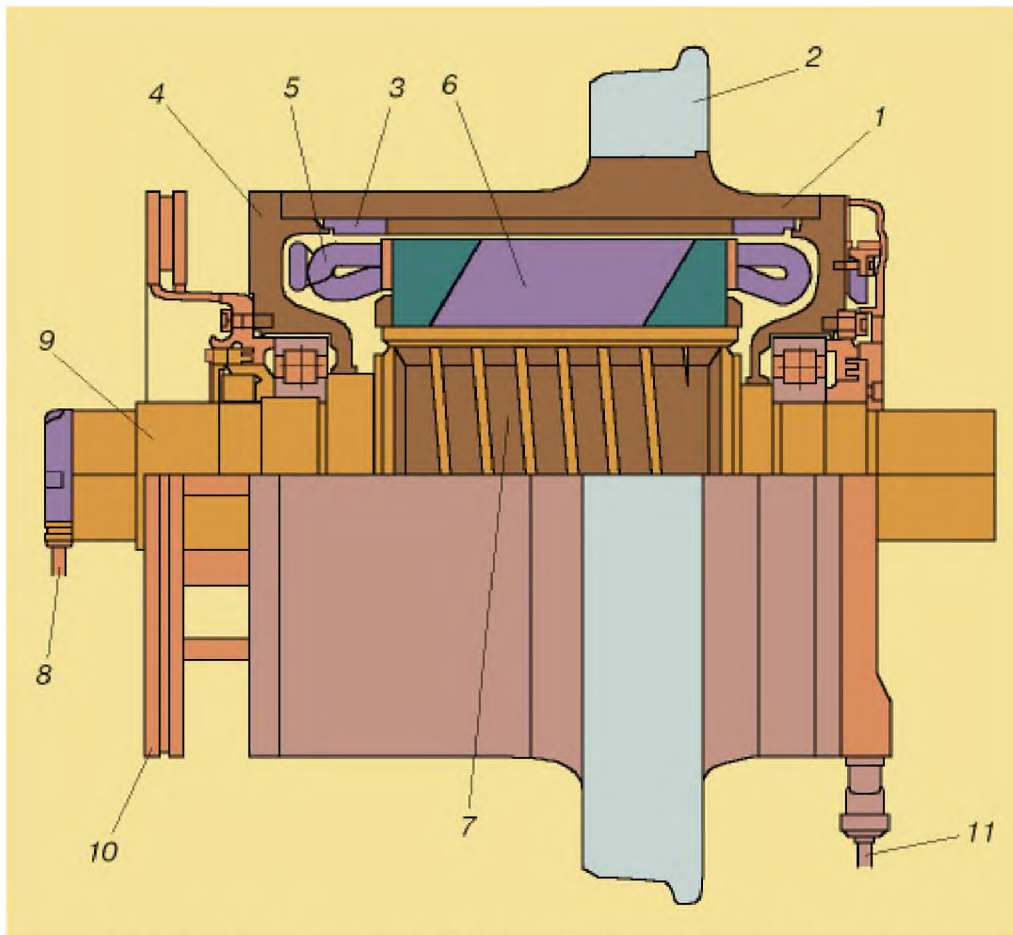


Рисунок 3 - Поздовжній розріз маточиноного приводу:

1 - труба корпусу зовнішнього ротора; 2 - колісний бандаж; 3 - стрижні коротко замкненої роторної обмотки; 4 - підшипниковий щит, що обертається; 5 - лобова частина статорної обмотки; 6 - пакет заліза статора; 7 - труба сорочки охолодження; 8 - штекерний роз'єм підведення живлення; 9 - порожня вісь; 10 - гальмівний диск; 11 - підведення охолоджуючої рідини

Таблиця 1 - Технічні дані маточиноного тягового приводу

Зовнішній діаметр труби корпусу, мм	440
Довжина двигуна, мм	460
Число полюсів	8
Схема включення обмоток статора	зірка
Витрата охолоджуючої рідини (вода з гліколем), л/хв	15
Номінальна потужність двигуна, кВт	35
Частота обертання номінального режиму, об/хв	240
Напруга на двигуні, В	380
Номінальний струм двигуна, А	100

Загальна маса кожного приводного блоку мотор-колесо становить 510 кг (без бандажу). Активні елементи двигуна (магнітопровід, обмотки, електричні з'єднувачі і т.д.) мають масу лише 208 кг. Решта припадає на пасивні елементи, які здебільшого використовуються і на немоторних колесах.

## Основні характеристики

Ступичний тяговий привід спеціально розроблено для рухливого складу, що використовується на лініях з номінальною напругою в контактній мережі 600 або 750 В постійного струму (рис. 4). Мінімальна допустима напруга становить 420 В, максимальна 900 В. При цьому магнітний потік у двигуні встановлюється незалежно від коливань напруги в контактній мережі в тому ступені, у якому це допускає система регулювання напруги перетворювача.

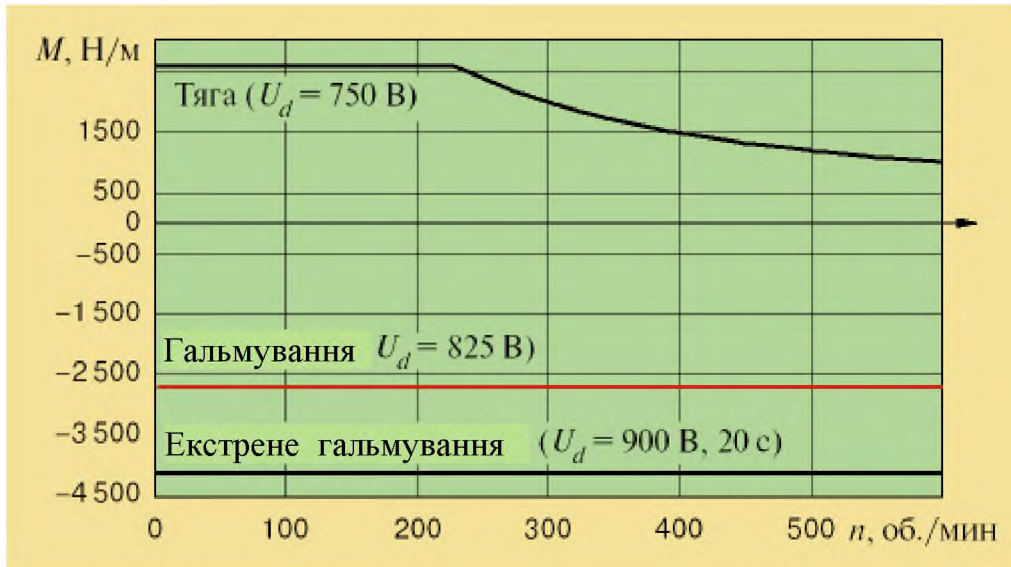


Рисунок 4 - Характеристики двигуна при напрузі мережі 750 В:  
 $M$  - крутний момент;  $n$  - частота обертання;  $U_d$  - напруга в контактній мережі

На рис. 4 наведено криві залежності крутного моменту двигуна від частоти обертання для режимів тяги, службового та екстреного гальмування.

### 3. СИНХРОННИЙ ТЯГОВИЙ ДВИГУН ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ВІД ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ

Тягові двигуни, збуджувані постійними магнітами, які мають велике число пар полюсів, дозволяють реалізувати безредукторний електричний тяговий привід. У цьому випадку досягається значне підвищення ККД і зниження маси в порівнянні з редукторним приводом.

Нові магнітні матеріали і транзистори IGBT дозволили приступити до робіт зі створення потужного тягового двигуна, збуджуваного постійними магнітами. Перші теоретичні дослідження показали значні переваги такого тягового приводу в порівнянні із широко застосовуваним трифазним асинхронним:

- двигун на постійних магнітах може мати набагато більше число пар полюсів, ніж трифазний асинхронний. Цим забезпечується настільки високий обертаючий момент, що стає можливим використання такого двигуна без редуктора, тобто реалізується безредукторний тяговий привід;
- оскільки двигун уже має магнітне поле збудження, а редуктор відсутній, тяговий тракт має підвищений ККД. У свою чергу, транзистори IGBT забезпечують подальше підвищення загального ККД усієї системи тягового приводу;
- двигун на постійних магнітах, що забезпечує підвищені потужність і обертаючий момент, має меншу масу та об'єм, ніж асинхронний двигун з редуктором;

- мотор з ротором, збуджуваним постійними магнітами, може без перетворювача передавати енергію гальмування на гальмівні резистори.

Розглянуті переваги забезпечують наступне:

- мала маса та високий ККД дозволяють заощаджувати енергію, затрачувану на тягу, і поліпшувати енерго- та екобаланс тягового рухливого складу;
- мала невіднесена маса знижує навантаження на верхню будову колії;
- розподілений тяговий привід дозволяє реалізувати більш просту концепцію електротранспорту. При цьому зменшується маса тягового приводу та одночасно підвищується його встановлена потужність. Це дозволяє створювати рухомий склад зі зниженим рівнем підлоги, у якому осьові навантаження можуть розподілятися більш рівномірно;
- виключаються всі недоліки, що пов'язані з редукторним тяговим приводом, а саме використання додаткового простору, зношування, втрати масла, що забруднюють навколишнє середовище, пожежонебезпека. Остання обставина має особливе значення, якщо охолодження двигуна на постійних магнітах реалізується без використання масла;
- можливий простий розв'язок системи електричного гальма з уповільненням, що задається, оскільки двигун у генераторному режимі надійно перемикається на гальмівні резистори.

Машини на постійних магнітах можуть також різнитися типом ротора:

- у машині з активним ротором усі магніти розташовано на роторі, а обмотки - на статорі;
- у машині з пасивним ротором усі магніти та обмотки розташовано на статорі.

Даний синхронний тяговий двигун розроблено у вигляді двох симетричних секцій потужністю по 250 кВт із порожнім ротором. Ці секції зістиковано на осі колісної (рис. 5). Двигун являє собою машину із зовнішнім ротором, у якій збудження здійснюється потужними постійними магнітами, а обмотки охолоджуються маслом.

Зовнішні ротори секцій мають виконання, що забезпечує оптимальний обертаючий момент, статори розташовано усередині. Кожний ротор має корпус із пластмаси, яка армована скловолокном, у нішах якого магніти закріплено на клеї таким чином, що утворюють кільцевий магнітний потік. Усього по окружності ротора розміщено 56 високоенергетичних магнітів зі сплаву FeNdB. Додатково магніти закріплено бандажами, виготовленими з композитів, що містять вуглецеве волокно. Завдяки цьому в області бандажів не утворюються вихрові струми.

### **Особливості двигунів зі збудженням від постійних магнітів**

У порівнянні із трифазними асинхронними тяговими двигунами машини, що збуджуються постійними магнітами, мають ряд принципових особливостей.

Обертове поле статора в такій машині повинно бути точно синхронізоване із частотою обертання ротора та залежить від його положення. У зв'язку із цим для кожної машини необхідна система, з високою точністю визначення положення ротора, і окремий перетворювач.

У машині на постійних магнітах поле збудження відключити неможливо, тому усередині неї завжди можуть попадати магнітні забруднювачі, наприклад металевий пил від гальмових колодок. У зв'язку із цим однією з обов'язкових умов застосування таких машин є їхнє герметичне виконання.

У результаті старіння матеріалу поле постійних магнітів може слабшати, у результаті чого зменшується обертаючий момент, що розвивається двигуном. У зв'язку із цим слід вибирати такий магнітний матеріал, який протягом терміну служби машини залишається

стабільним.

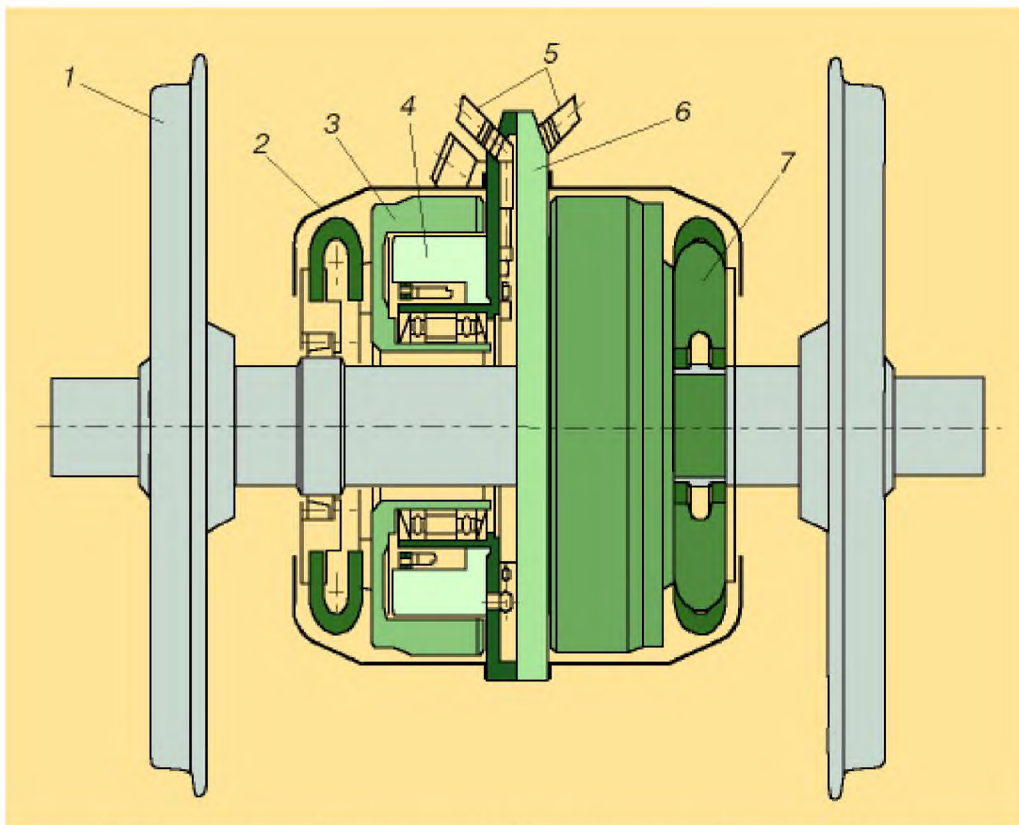


Рисунок 5. Синхронний двигун зі збудженням від постійних магнітів, який встановлено на колісній парі:

1 - колісна пара; 2 - кожух двигуна; 3 - ротор з постійними магнітами; 4 - статор з обмотками; 5 - елементи кріплення двигуна до рами візка; 6 - несучий диск; 7 - муфта

Оскільки велика кількість пар полюсів обумовлює досить високу основну частоту струму котушок, крива якого до того ж має прямокутну форму, виникає велика кількість гармонік широкого спектра частот. Взаємодіючи із власними частотами елементів машини, ці гармоніки можуть стати причиною виникнення значного шуму. Крім того, обумовлені ними електромагнітні впливи не повинні перевищувати допусків, що встановлені на залізницях.

Машина з активним ротором, тобто несучим постійні магніти, має свої додаткові особливості. З одного боку, такий двигун здатний переходити в режим електричного реостатного гальмування при відключеному тяговому перетворювачі, що дозволяє прилічити його до електричних машин, що забезпечують надійне гальмування. З іншого боку, пропорційність частоти обертання постійних магнітів ротора електромагнітній силі, що індукується означає, що при зниженні рівня напруги проміжної ланки до певної величини, значення частоти обертання, що задаються, і відповідно швидкості руху поїздів не можуть бути досягнуті. У зв'язку із цим режим напруги проміжної ланки повинен надійно контролюватися, а в процесі регулювання двигуна по можливості частіше повинні використовуватися можливості ослаблення поля.

При відключеному тяговому перетворювачі активний ротор збуджує в залізі статора вихрові струми, величина яких залежить від частоти обертання двигуна, що працює в режимі холостого ходу, тобто, коли поїзд рухається на вибігу. Виникаючі при цьому теплові втрати повинні відводитися системою охолодження щоб уникнути термічних ушкоджень двигуна.

При короткому замиканні в обмотках статора також можливі термічні ушкодження, тому що навіть при відключеному тяговому перетворювачі підживлення короткозамкненої обмотки струмом триває в результаті обертання магнітів ротора. Таким чином, для машини з активним ротором необхідний надійний відвід теплових втрат у режимі короткого замикання.

#### 4. БЕЗКОНТАКТНИЙ ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

З метою поліпшення властивостей двигунів постійного струму було створено двигуни з безконтактним комутатором, що мають назву безконтактними двигунами постійного струму (БДПС). Відмінність БДПС від колекторних двигунів традиційної конструкції полягає в тому, що в них щітково-колекторний вузол замінено напівпровідниковим комутатором (інвертором), керованим сигналами, що надходять із безконтактного датчику положення ротора. Робочу обмотку двигуна - обмотку якоря - розташовано на сердечнику статора, а постійний магніт - на роторі.

Вал двигуна Д (рис. 6,а) механічно з'єднано з датчиком положення ротора ДПР, сигнал від якого надходить у комутатор БК. Підключення секцій обмотки якоря до джерела постійного струму відбувається через елементи блоку комутатора БК. Призначення ДПР - видавати керуючий сигнал у блок комутатора відповідно до положення полюсів постійного магніту відносно до секцій обмотки якоря.

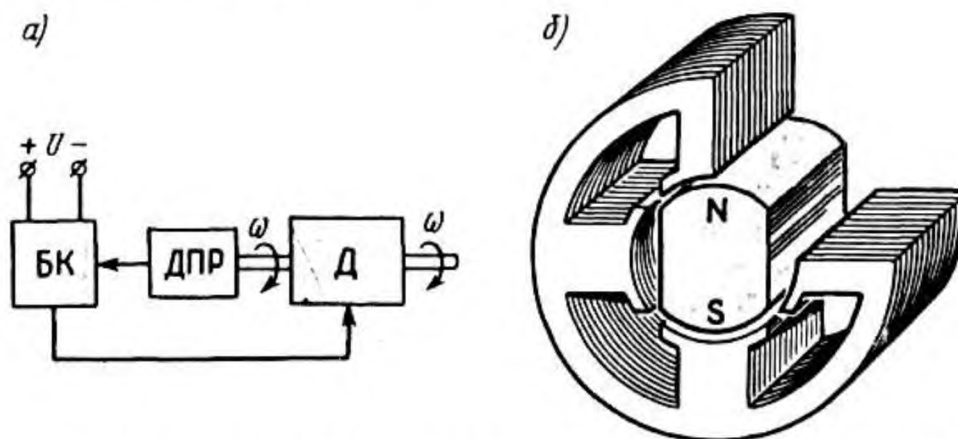


Рисунок 6 - Структурна схема (а) і магнітна система (б) чотирьохфазного безконтактного двигуна постійного струму

У якості датчиків положення ротора застосовують різноманітні чутливі безконтактні елементи з мінімальними розмірами та споживаною потужністю і великою кратністю мінімального і максимального сигналів, щоб не викликати порушень у роботі блоку комутатора. Чутливі елементи ДПР повинні надійно працювати при зовнішніх впливах (температура, вологість, вібрації і т.п.), на які розраховано двигун. Такі особливості властиві ряду чутливих елементів (датчиків): індуктивних, трансформаторних, магнітодіодів і т.п. Найбільше доцільно використовувати датчики ЕРС Холла (рис. 7), що представляють собою тонку напівпровідникову пластину з нанесеними на ній контактними площадками, до яких припаяні виводи 1-2, що підключені до джерела напруги  $U_1$  і виводи 3-4, з яких знімають вихідний сигнал  $U_2$ . Якщо в колі 1-2 проходить струм  $I$ , а датчик перебуває в магнітному полі, вектор індукції  $B$  який перпендикулярний площини пластини датчика, то в датчику наводиться ЕРС і на виводах 3-4 з'являється напруга  $U_2$ . Значення ЕРС залежить від струму  $I$  і магнітної індукції  $B$ , а полярність - від напрямку струму  $I$  у колі 1-2

і напрямку вектора магнітної індукції  $B$ .

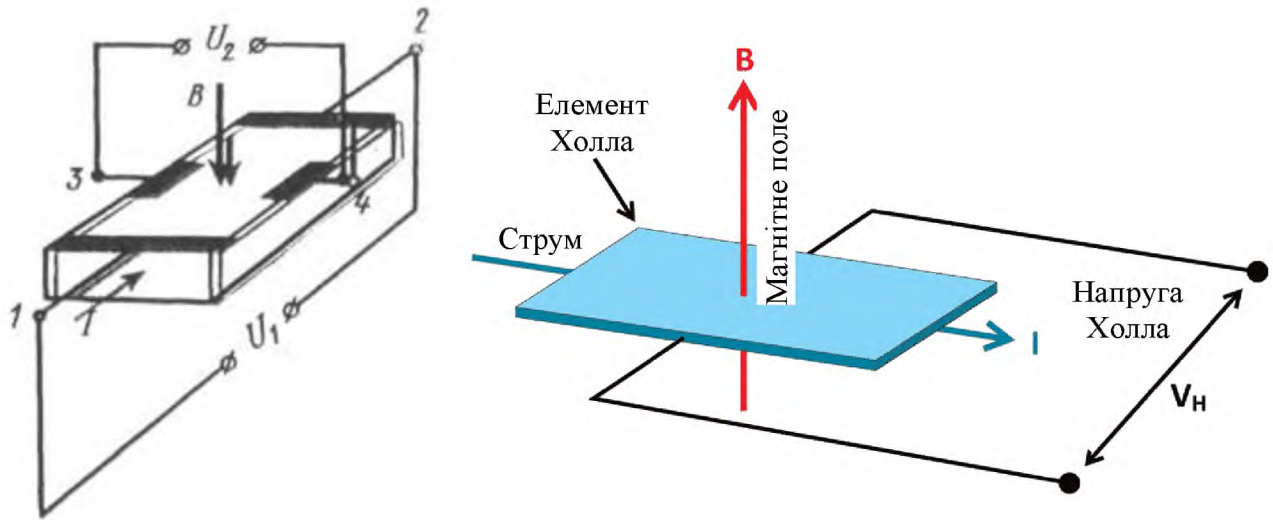


Рисунок 7 - Датчик ЕРС Холла

Ефект Холла - це виникнення електричного поля в провіднику або напівпровіднику зі струмом при приміщенні його в магнітне поле.

Ефект Холла - наслідок впливу сили Лоренца на рух носіїв струму. У магнітному полі  $\vec{B}$  при протіканні через провідник струму із щільністю  $\vec{j}$  встановлюється електричне поле з напруженістю:

$$\vec{E} = R[\vec{B}, \vec{j}], \quad (16.1)$$

де  $R$  – постійна Холла.

## Лекція № 13 (2 год.)

### Тема 5 Високовольтна тягова батарея для електричного автотранспорту та систем накопичення електроенергії

#### 1. Високовольтна тягова акумуляторна батарея

Нагадаю, що умовно в електромобілі можна виділити 3 основні складові елементи (системи): джерело енергії, рухова і допоміжна системи.

На попередніх лекціях ми розглянули ...

У цій лекції ми будемо говорити про один з дуже важливих елементів електромобіля, а саме про джерело енергії. А якщо бути більш точним, то про високовольтну тягову акумуляторну батарею (ТАКБ).

Сьогодні ми розглянемо основні параметри тягової АКБ, такі як: щільність енергії, довговічність АКБ, ККД і ємність батареї. І звичайно ж розглянемо різні типи акумуляторів, які використовуються в електромобілях.

Отже, на даний момент, акумулятор є одним з найбільш дорогих елементів електромобіля. Він може становити до половини вартості всього електромобіля. Також, від ємності батареї безпосередньо залежить відстань, яке здатний проїхати електромобіль на одній зарядці. Звичайно, на дальність пробігу від однієї зарядки впливають багато чинників, про які ми поговоримо на наступних заняттях, але ємність акумулятора є визначальною.

Тягова АКБ забезпечує електроживлення для роботи електромобіля. Батарея віддає постійну напругу блоку силової електроніки. Блок силової електроніки перетворює постійну напругу в змінну і живить електродвигун-генератор.

#### 2. Основні параметри для тягової АКБ

##### *Щільність енергії*

Цей параметр дозволяє нам зробити висновок про потужності батареї.

Щільність енергії – це кількість енергії, яка може зберігатися в даній масі речовини. Одиницею вимірювання щільності енергії є Вт·година, поділена на кілограм [Вт·год/кг]. Щільність енергії дозволяє визначити запас ходу електромобіля.

##### *Довговічність батареї*

Ще одне важливе питання стосується терміну служби акумулятора. Довговічність батареї описується параметром стійкості до багаторазових циклів розрядки-зарядки, від умов використання, включаючи температуру навколишнього середовища. Щоб приблизно розуміти зниження ресурсу батареї, слід розглядати конкретний електромобіль.

В даний час виробники пропонують гарантію на свої батареї. Наприклад, на Nissan Leaf виробник пропонує гарантію на акумулятор і електродвигун на термін до п'яти років або 60 тисяч миль.

Гарантія Renault поширюється на електричний хетчбек Zoe на відстань до 100 тисяч миль або на термін у три роки, в той час як Tesla пропонує восьмирічну гарантію на модель S, яка не залежить від пробігу і може передаватися між власниками.

До речі, термін служби батареї зменшується, якщо автомобіліст постійно використовує технологію швидкої зарядки. Заряджаючи акумулятор за допомогою пристроїв, які відновлюють до 80% заряду за 30-60 хвилин, можна в 1,5-2 рази прискорити процес деградації джерела живлення. Для того щоб батарея прослужила довше, її рекомендується залишати підключеною до зарядного пристрою на кілька годин – наприклад, на ніч. Таким чином можна знизити зарядний струм, отже, і нагрівання елементів тягової батареї.

### ***ККД***

Коефіцієнт корисної дії тягової АКБ, що перезаряджається вказується у процентах. Спрощено можна сказати, що ККД показує, яку кількість енергії, витраченої на зарядку, можна буде знову використати при розряді акумуляторної батареї. Внаслідок того, що незначна частина енергії зарядки розсіюється у вигляді теплової енергії (втрати при зарядці), коефіцієнт корисної дії акумуляторної батареї ніколи не може дорівнювати 100%.

### ***Ємність батареї електромобіля***

Практично кожний електричний автомобіль використовує свій тип батареї. Акумулятори відрізняються ємністю і забезпечують різний запас ходу. І хоча максимальна відстань, яку може проїхати електромобіль, залежить ще й від його конструкції, ваги, типу електродвигуна тощо, цю цифру можна використовувати для порівняння батарей. На слайді ви можете побачити таблицю порівняння акумуляторів популярних електромобілів.

Табл. 1. Порівняння акумуляторів популярних електромобілів по ємності і запасу ходу

## **3. Типи акумуляторних батарей**

Різні типи акумуляторних батарей, що перезаряджаються різняться матеріалами, використаними для виготовлення електродів і електролітів.

У двох словах скажу з чого ж складається батарея. Акумулятори складаються з трьох основних компонентів: анода, катода і електроліту. І анод, і катод є типами електродів. Електроди (це анод і катод) – це провідники, через які електрика входить або виходить з компонента в ланцюзі. Електроліт – це речовина, часто рідина або гель, здатна переносити іони між хімічними реакціями, які відбуваються на аноді і катоді.

Останнім часом з'явилися також твердотільні акумуляторні батареї. Тобто в даному типі батарей в якості електроліту використовується не рідка, а тверда речовина.

Отже, тип батареї залежить від матеріалів, які використовуються в якості катода, анода і електроліту.

### ***Свинцева акумуляторна батарея***

Почнемо зі свинцевою акумуляторної батареї. Вона являє собою класичну 12-вольтну акумуляторну батарею для живлення бортової мережі автомобіля. В якості електродів служать пластини зі свинцю і окису свинцю, в якості електроліту – розчин сірчаної кислоти.

Свинцеві акумуляторні батареї вимагають обслуговування. Це означає, що в них необхідно доливати дистильовану воду, щоб забезпечити необхідний рівень електроліту. Для живлення автомобілів, що рухаються виключно на електричній тязі, свинцево-кислотні батареї не підходять. Причиною тому є їх дуже велика маса. Така батарея зайняла б більшу частину об'єму автомобіля, а це призвело б до зниження корисного навантаження автомобіля.

Свинцевий акумулятор може вже через 6 років втратити більшу частину своєї електричної ємності. А також, в разі пошкодження, з нього може витікати електроліт (кислота).

### ***Нікель-кадмієві акумуляторні батареї***

Наступний тип тягових АКБ – це нікель-кадмієві акумуляторні батареї. У цих батареях в якості матеріалу електродів використовується кадмій (Cd) і з'єднання нікелю. В якості електроліту служить гідроксид калію. Тому цей тип батарей називають також лужними акумуляторами. Вони володіють більшою щільністю енергії, ніж свинцеві акумулятори, і більш стійкі до пошкоджень і витікання електроліту.

Але їм притаманні два величезних недоліку, які роблять їх практично непридатними для повноцінного використання в електромобілях.

- 1) Кадмій і сполуки кадмію отруйні.
- 2) Нікель-кадмієві батареї володіють ефектом пам'яті.

Ефект пам'яті, також відомий як ефект «ледачою батареї», – це ефект, який змушує батарею приймати і тримати менше заряду. Тобто, батареї поступово втрачають свою максимальну енергетичну ємність, якщо вони багаторазово перезаряджаються після неповної розрядки. Таким чином акумулятор запам'ятовує меншу ємність батареї ніж вона була спочатку.

### ***Нікель-металогідридні акумуляторні батареї***

Далі ми переходимо до нікель-металогідридних АКБ. У цих батареях в якості матеріалу для електродів використовується з'єднання нікелю та з'єднання іншого металу. В якості електроліту також використовується гідроксид калію. У свою чергу вони мають більшу щільність енергії ніж нікель-кадмієві батареї і відносно стійкі до пошкоджень.

Ефект пам'яті, властивий нікель-кадмієвих батарей, проявляється в меншій мірі. Але і у цих акумуляторних батарей протягом терміну служби коефіцієнт корисної дії знижується. Ці втрати ККД до певної міри обернені (усуваються).

Перевагою нікель-металогідридних акумуляторних батарей є те, що, вони не містять таких отруйних важких металів, як свинець або кадмій. Електроліт в батареї

міститься в твердому вигляді. Навіть в разі руйнування корпусу можливі тільки окремі бризки.

### ***Літій-іонні акумуляторні батареї***

Нарешті ми переходимо до літій-іонним АКБ. Ці батареї найбільш сучасні і поширені в електромобілях.

В якості електродів використовуються різні оксиди металевого літію і графіту, в якості електроліту різні розчинники для солей літію. Літій-іонні батареї містять тільки незначну кількість води і не мають ефекту пам'яті. У порівнянні з нікель-кадмієвими батареями вони мають майже вдвічі більшу щільність енергії. Це означає, що даний тип батарей вимагає меншого простору для установки в електромобілі, так що залишається більше вільного простору для пасажирів і багажного відсіку.

Але, при сильному нагріванні в батареї може початися процес розпаду. Це може призвести до займання та виділення шкідливих для здоров'я газів. Тому при поводженні з цими акумуляторними батареями необхідно строго виконувати вказівки виробника з техніки безпеки.

До речі кажучи, слово «літій» походить від грецького «lithos», що означає камінь, тому що він був виявлений в 1817 у камені.

Літій-іонний акумулятор – це не якийсь конкретний вид батарей з єдиним затвердженим складом, а ціле сімейство батарей з різними складами електрохімічних елементів. Кожен тип літій-іонної батареї підходить для конкретної сфери застосування. І звичайно ж, далеко не всі вони використовуються в електротранспорті. Давайте розглянемо ті, які застосовуються як тягові АКБ.

### ***Літій-марганцевий акумулятор (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)***

Літій-марганцевий акумулятор (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) завдяки тривимірній структурі може забезпечити високий струм розряду, який до 30 разів перевищує його ємність. Такий тип батарей використовується в електромобілях Nissan Leaf і BMW i3. Але у літій-марганцевих акумуляторів є недоліки: невеликий життєвий ресурс і нетерпимість до холоду. Тому літій-марганцевої батареї комбінують з іншим типом акумуляторів – NMC (літій-нікель-марганець-кобальт-оксидний акумулятор LiNiMnCoO<sub>2</sub>).

### ***Літій-нікель-марганець-кобальт-оксидний акумулятор (NMC - LiNiMnCoO<sub>2</sub>)***

NMC мають непогану питому енергоємність і термін служби до 2000 циклів заряду/розряду, але струм віддачі у них невеликий. Саме тому для використання в електромобілях NMC комбінують з LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. При звичайній їзді в основному працюють NMC-комірки, а при прискоренні високий струм віддають комірки LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

### ***Літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні батареї (LiNiCoAlO<sub>2</sub>, або NCA)***

NCA батареї мають високу питому ємність і прийнятну вартість. Швидкість зарядки і ток розрядки у NCA-акумуляторів середні. Саме NCA стали джерелом енергії для автомобілів Tesla і систем зберігання Powerwall.

До речі кажучи, саме використання цих батарей кинуло тінь на компанію Tesla. Адже даний акумулятор має термін служби в 500 циклів. Реальний досвід показав, що навіть через 200 тисяч кілометрів батареї в електромобілях Tesla залишаються робочими, втрачаючи третину ємності.

#### ***Літій-титанатні акумулятори ( $Li_4Ti_5O_{12}$ , LTO)***

Даний тип батарей знаходиться в розробці компанії Toshiba. Вони виробляють цей тип батарей під назвою SCiB (Super Charge Ion Battery).

У 2017 році Toshiba продемонструвала SCiB-батарею, здатну відновити до 90% своєї ємності всього за 5 хвилин.

Літій-титанатні батареї стабільно віддають струм, що в десять разів перевищує їх ємність, і в тридцять разів при імпульсних навантаженнях. Сучасні зразки таких акумуляторів забезпечують 15000-20000 циклів. Крім того, LTO-батареї пожегобезпечні і стійкі до холоду.

Але, LTO-батареї мають ряд недоліків, які поки обмежують коло їх застосування. В першу чергу, це низька питома ємність 50-80 Вт/кг, тоді як у традиційних літій-кобальтових елементів вона дорівнює 150-200 Вт/кг. Це означає, що для отримання рівної ємності літій-титанатам комірка повинна бути вдвічі-втричі об'ємнішою. По-друге, номінальна напруга комірки дорівнює всього 2,4 В проти 3,6 В у літій-кобальтових. По-третє, поки літій-титанатні батареї відрізняються високою ціною, втричі більшою, ніж у NCA-батареї.

Натомість літій-титанатні АКБ можуть використовуватися в електробусах. Там немає дефіциту місця, а також потрібен високий ресурс батареї.

#### ***Літій-залізо-фосфатний акумулятор***

І останній тип який ми розглянемо – це літій-залізо-фосфатні АКБ. Це акумуляторні літій-іонні комірки, які використовують  $LiFePO_4$  в якості матеріалу катода.

Основною перевагою  $LiFePO_4$  над Li-ion є підвищений діапазон робочих температур. Додаткові переваги залізо-фосфатного акумулятора включають більш тривалий термін служби та швидшу зарядку.

Основними недоліками літій-залізо-фосфатних АКБ є менша щільність заряду і велика чутливість до зберігання при підвищених температурах.

### **4. Твердотельные акумуляторные батареи**

Твердотільні батареї мають не рідкий (гель) електроліт, а твердий.

Вони працюють за тим же принципом, що і іонні: при зарядці іони літію переміщуються на катод, звідки при виключенні зарядного пристрою відправляються у вільне плавання через електроліт назад до анода, створюючи електричний струм. Зміна в матеріалах дозволяє домогтися значної зміни властивостей, в тому числі максимального об'єму, часу зарядки, розміру і рівня безпеки.

Основними перевагами твердотільних АКБ є:

1) ***компактність***

В першу чергу, перехід від рідкого до твердого електроліту забезпечує збільшення кількості енергії на той же розмір акумулятора. У «рідкотільних» батареях необхідний відчутний шар рідини і спеціальний сепаратор, який розділяє катод і анод, щоб уникнути короткого замикання. Для твердотільного акумулятора досить куди більш тонкого бар'єру.

Звичайно, сепаратор є не єдиним об'ємним елементом всередині батареї, наприклад катод з анодом так стиснути вийде. Але все ж в твердотільну батарею «влізть» приблизно вдвічі більше енергії, ніж в літій-іонну такої ж товщини або ще можна сказати такого ж об'єму.

## 2) Надійність

Твердотільні електроліти куди менше схильні до хімічних реакцій, тому вони працюють довше. Також це означає, що такі батареї не загоряться і не вибухнуть від технічних дефектів або при пошкодженні.

## 5. Суперконденсатори

Також, окремо слід виділити суперконденсатори – це нове джерело енергії, яке використовується в електромобілях і гібридах. Суперконденсатори значно поступаються іншим тяговим акумуляторам за питомою ємністю, але також і мають незаперечні переваги.

Одним з них є здатність практично миттєво заряджатися за 10-20 секунд (швидкість заряду, фактично, визначається потужністю зарядного пристрою), мають на порядок більше число циклів заряду-розряду і гарантовано можуть експлуатуватися на протязі 10-15 років (залежить від типу суперконденсатора і його технології виробництва).

Але, як вже говорилося, енергії вони запасують значно менше, ніж, наприклад, літій-іонні тягові батареї. Одного заряду вистачить, щоб проїхати від 2 до 20 км (в залежності від ємності блоку суперконденсаторів). Тому суперконденсатори поки не знайшли широкого застосування в тягових установках електротранспорту.

Але такі транспортні засоби мають величезний потенціал використання в якості громадського транспорту. Наприклад, у китайському місті Нінбо провінції Чжецзян існує екологічно чистий маршрут громадського транспорту. По ньому пересувається електробус, який отримує порівняно невеликий запас енергії, за час приблизно рівний 10 секундам, на зупинках під час посадки-висадки пасажирів *рис. 7*.

Цікавим є новий тип електробуса розроблений компанією Zhuzhou Electric Locomotive, яка запропонувала оснащувати громадський транспорт спеціальними гніздами на даху для швидкої підзарядки. На зупинках уздовж маршруту є кронштейни із штекерами, які вставляються в автобусні роз'єми. Одна така підзарядка забезпечує пробіг до 5 км. Вона працює завдяки суперконденсаторам, розрахованим на мільйон циклів перезарядки і 12 років служби і має робочі температури від -40 до +65 °С.

Давайте підсумуємо всю отриману інформацію за типами тягових акумуляторів. Порівняльна таблиця різних накопичувачів енергії представлена на слайді.

На цьому ми завершуємо лекцію по АКБ. Сьогодні ми розібрали основні електричні параметри тягових АКБ. Також, розглянули види батарей, що використовуються в електричному транспорті, та особливості їх експлуатації.

## Лекція № 14 (2 год.)

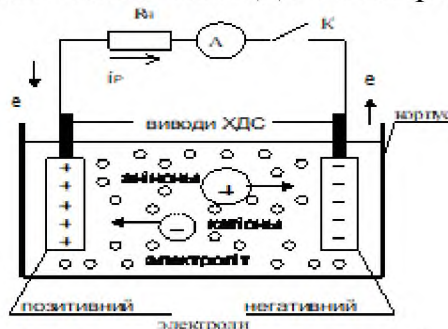
### Тема 5 Високовольтна тягова батарея для електричного автотранспорту та систем накопичення електроенергії

#### 1. ВИЗНАЧЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ХІМІЧНИХ ДЖЕРЕЛ СТРУМУ

Хімічним джерелом струму (ХДС) називають пристрій, у якому хімічна енергія закладених у ньому речовин безпосередньо перетворюється в електричну енергію при протіканні електролітичної реакції.

ХДС широко використовуються для живлення радіотехнічних пристроїв. Наприклад, акумулятор 12СТ70М1 використовуються у ЗРК "ОСА", "БУК" у радіолокаційних станціях 19Ж6, 22Ж6, 55Ж6. Сучасні ХДС досить компактні і можуть використовуватися як переносні, автономні джерела живлення.

Основними конструктивними елементами ХДС є електроди, електроліт і корпус.



**Електрод** - частина ХДС, що знаходиться в контакт з електролітом. На поверхні електрода протікає хімічна реакція.

Електроди просторово розділені провідником з електронною провідністю (другого роду) - електролітом. Електроди й електроліт розташовані в корпусі джерела струму.

Електрод, на якому в процесі перетворення хімічної енергії в електричну (при розряді) протікає реакція окислювання, називається негативним або **анодом**, а електрод, на якому при цьому протікає реакція відновлення, називається позитивним або **катодом** ХДС.

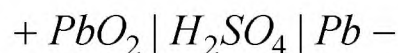
Активні речовини електродів і електроліт утворюють електрохімічну систему ХДС.

Умовно вона зображується так

«+» Активна речовина катода / електроліт / активна речовина анода «-»

Активні речовини електроліту позначаються хімічними формулами, вертикальна риска позначає межу зіткнення електрода з електролітом.

ПРИКЛАД:



**Розрядом** ХДС називають процес, під час якого хімічне джерело віддає енергію в зовнішнє коло.

**Зарядом** ХДС називається процес перетворення електричної енергії в хімічну енергію активних речовин шляхом пропускання через ХДС електричного струму від зовнішнього джерела. При цьому продукти розряду відновлюються до початкових активних речовин.

Розглянемо електрохімічні процеси, що протікають при розряді і заряді ХДС.

При розряді електрони під впливом різниці електродних потенціалів ХДС рухаються в зовнішньому ланцюзі від негативного електрода до позитивного. Так як *напрямок струму в*

<sup>1</sup> 12 банок (2Вх12=24В), 70Ач. СТ-стартерний. У маркуванні СТ-стартерний,СК-для прискороного розряду, С-стаціонарний

провідниках другого роду обумовлено рухом позитивних і негативних іонів у протилежних напрямках, напрямок струму умовно вважається збіжним із напрямком катіонів. Катіони завжди рухаються назустріч електронам зовнішнього кола, тобто при розряді катіони рухаються до позитивного електрода.

Переміщення електронів у колі компенсується реакціями відновлення на позитивному електроді і реакцією окислювання на негативному.

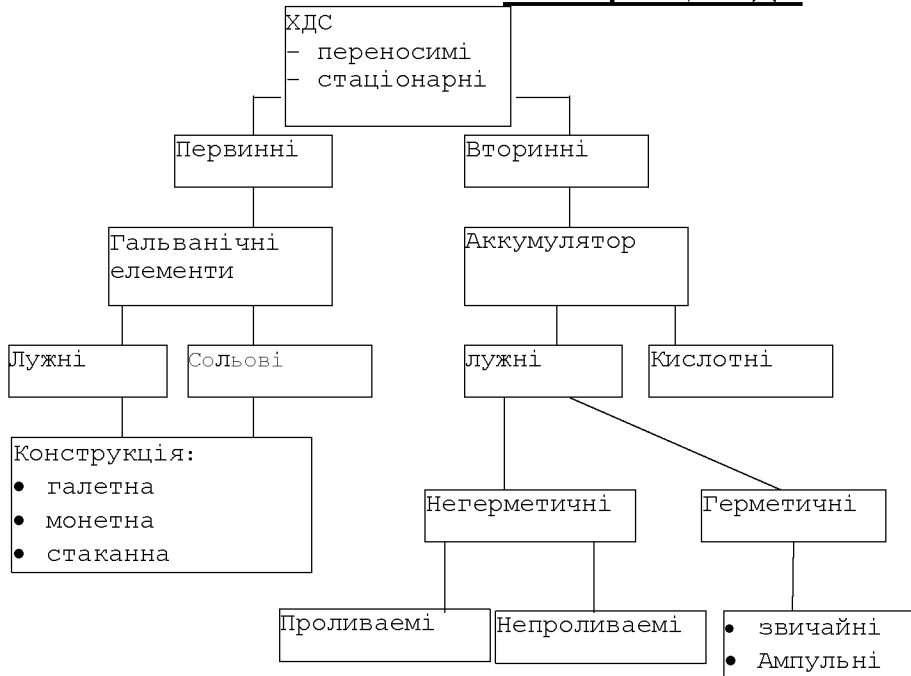
Реакція окислювання супроводжується віддачею електронів у зовнішнє коло, а реакція відновлення надходженням електродів із зовнішнього кола.

Напрямок струму заряду протилежний напрямку струму розряду.

Внаслідок цього, електрохімічні процеси, що протікають під час заряду, зворотні тим, що протікають під час розряду.

У результаті при розряді утворюються початкові речовини.

### Класифікація ХДС



Хімічні джерела струму поділяються на первинні і вторинні. **Первинне** хімічне джерело струму призначено тільки для РАЗОВОГО безупинного або переривчастого розряду. **ВІДНОВИТИ ЙОГО ХІМІЧНУ ЕНЕРГІЮ НЕМОЖЛИВО!** .

**Вторинний** ХДС призначений для багатократного використання за рахунок відновлення його хімічної енергії шляхом ЗАРЯДУ.

Вторинне джерело струму, яке складається з одного електролітичного осередку, називається акумулятором.

Вторинний ХДС, складений із двох і більш акумуляторів, з'єднаних між собою електрично для сумісного виробництва електричної енергії, називають акумуляторною батареєю (АБ).

Первинний ХДС, який складається з однієї гальванічної комірки, називається гальванічним елементом.

## **2. ПАРАМЕТРИ ХДС, РЕЖИМИ ЗАРЯДУ ХДС**

Акумулятор як джерело електричної енергії має ряд характеристик, основними з яких є електричні. До них відносяться:

- напруга розімкнутого кола (ЕРС);
- внутрішній опір;
- напруга;
- ємність;
- питома енергія;

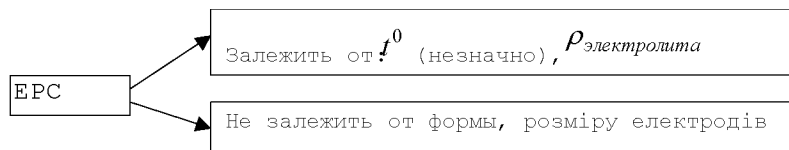
- питома потужність;
- саморозряд.

### ЕРС

ЕРС визначається різницею потенціалів на електродах

$$E = \varphi_a^{(+)} - \varphi_k^{(-)}$$

Величина ЕРС одного елемента невелика і має значення від 1,4 до 2,1 В для різних електрохімічних систем.



### Внутрішній опір ( $r_{акк}$ )

(важлива характеристика)

**Внутрішній опір акумулятора є сумою омичного опору ХДС і поляризаційних опорів електродів. Чим менше  $r_{акк}$ , тим більший струм акумулятор здатний віддати в навантаження.**

Поляризацією електрода ХДС називається різниця між потенціалом електрода при розряді або заряді і його потенціалом при відсутності струму.

Поляризаційним опором електродів називається величина, чисельно рівна відношенню поляризації електрода до значення струму, що проходить через електрод.

**Внутрішній опір акумулятора при розряді збільшується! Також  $r_{акк}$  зростає з підвищенням температури.**

Малі значення  $r_{акк}$  дозволяють одержати силу розрядного струму до 1000А. Однак мале значення  $r_{акк}$  робить небезпечним струм короткого замикання для ХДС.

### Напруга

Напруга ХДС - це різниця потенціалів між його позитивним і негативним електродами при ЗАМКНУТОМУ зовнішньому колі.

Напруга акумулятора при розряді менше його ЕРС на величину падіння напруги на внутрішньому опорі акумулятора й опорі навантаження.

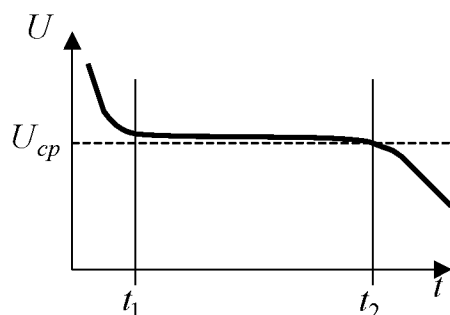
$$U = E - I_p (r_{акк} + R_n)$$

$U$  -- напруга акумулятора, В

$I_p$  -- сила розрядного струму, А;

$R_n$  -- опір навантаження.

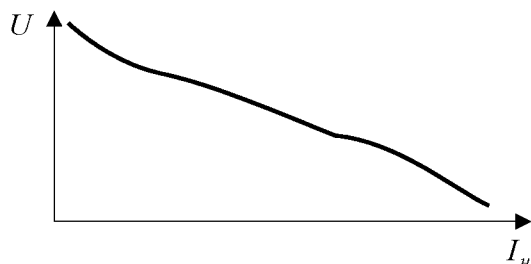
Напруга акумулятора залежить від часу розряду, ця залежність представляється у виді розрядної кривої.



Розряд акумулятора характеризується початковою, середньою і кінцевою напругою. Початкова напруга менше ЕРС на величину падіння напруги на внутрішньому опорі.

Середнє значення визначає розрядну енергію акумулятора. Кінцева напруга характеризує стан акумулятора і його можливості з віддачі енергії в мережу.

Залежність напруги акумулятора від струму навантаження являє собою зовнішню характеристику акумулятора  $U = f(I_n)$



#### Ємність хдс

Ємність акумулятора - це кількість електрики в ампер-годинах, що може віддати цілком заряджений акумулятор при розряді від початкового значення напруги до кінцевого. Ємність акумулятора при розряді називається розрядною.

#### Розрядна ємність

$$Q_p = \int_0^{t_p} i_p dt$$

При постійному струмі розряду

$$Q_p = I_p t_p$$

Ємність акумулятора визначається при розряді його номінальним струмом, під яким розуміється струм рівномірного 10-ти годинного розряду для кислотних акумуляторів і 8 годинного для лужних акумуляторів.

Розрядна ємність ХДС залежить від кількості активних речовин, конструкції електродів, густини електроліту і його температури, сили розрядного струму і режиму розряду.

При підвищенні температури від  $0^0$  до верхньої межі ємність акумулятора збільшується.

#### Зарядна ємність ХДС

Зарядною ємністю ХДС  $Q_3$  акумулятора називають кількість електрики, що надається акумулятору при його заряді.

**ЗАВЖДИ**

$$Q_3 > Q_p$$

Зарядна ємність визначається за формулою

$$Q_3 = \int_0^{t_3} i_3 dt$$

При постійному струмі заряду

$$Q_3 = I_3 t_3$$

#### Питомі характеристики

#### Питома енергія

$$W_{nut} = \frac{QU_{cp}}{G};$$

**Питома потужність** - максимальна потужність акумулятора, віднесена до його маси.

$$P_{\text{пит}} = \frac{UI}{G};$$

### Саморозряд

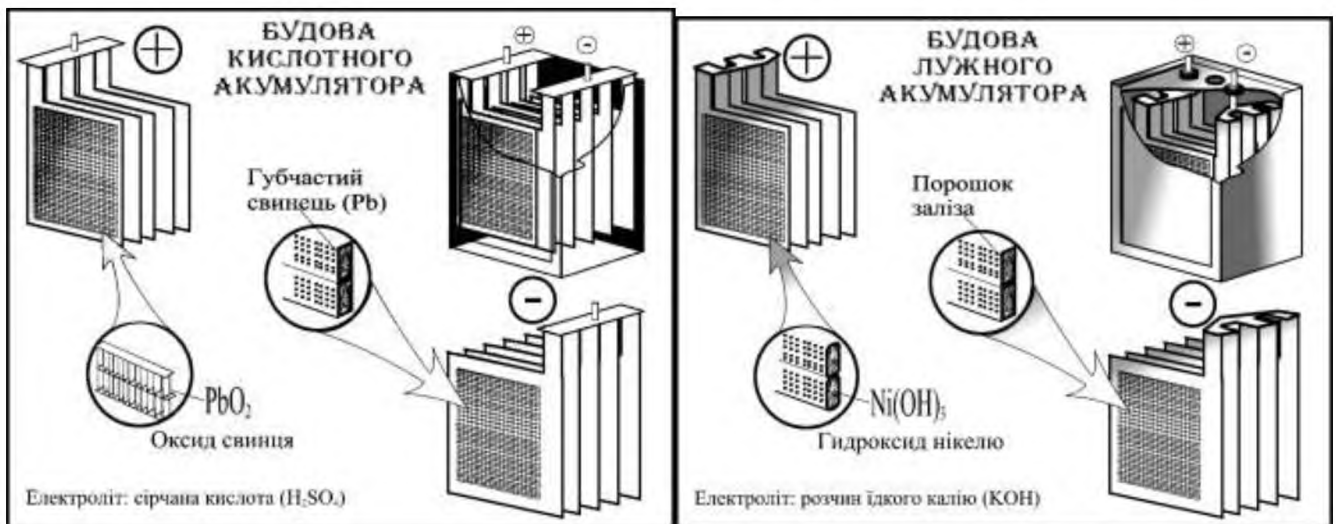
Саморозрядом акумулятора називається втрата їм енергії, обумовлена протіканням у ньому самовільних процесів у результаті впливу електроліту на активні речовини.

Саморозряд збільшується з підвищенням температури, тому АБ рекомендується берегти в прохолодному місці.

## 3. ВИКОРИСТАННЯ КИСЛОТНИХ ТА ЛУЖНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ НА ТРАНСПОРТІ

Через можливість багаторазового використання та надійність найбільш широке поширення у радіотехнічних системах отримали кислотні та лужні акумулятори.

Розглянемо їх будову.



### Завдання на самостійну роботу:

Повторити питання:

1. Що таке ХДС?
2. Класифікація ХДС;
3. Конструктивні елементи ХДС;
4. ЕРС ХДС;
5. Напруга ХДС;
6. Полярізаційний опір ХДС;
7. Ємність ХДС
8. Розрядна ємність ХДС;
9. Зарядна ємність ХДС;
10. Будова кислотного акумулятора;
11. Будова лужного акумулятора.

## Лекція № 15 (2 год.)

### Тема 5 Високовольтна тягова батарея для електричного автотранспорту та систем накопичення електроенергії

#### 1. Накопичувач енергії для автомобільного транспорту на іоністорах

Для того, щоб з'ясувати який автобус буде менше споживати паливо (або електричну енергію), проведемо порівняння звичайного дизельного автобусу, гібридного автобусу, електричного автобусу на акумуляторах та автобусу на суперконденсаторах.

Для коректного представлення даних, вибрано один маршрут в м. Харків, («Пролетарська» – «Проспект Гагаріна», маршрут № 147). Довжина шляху в одну сторону дорівнює 20,4 км. Час руху становить 55 хв. Кількість зупинок складає 36.

В Харкові на цьому маршруті ходить дизельний автобус «Богдан» А092. На один маршрутний проїзд витрачається 6,7 літрів дизельного пального. За один день автобус робить 10 таких поїздок. Ціна 1 л дизельного пального 16,80 грн. Витрати на пальне на один день складають 1126 грн.

Якщо обрати гібридний автобус, для приведення в рух якого використовується не тільки дизельний двигун, а і електричний двигун потужністю 180 кВт, то отримаємо приблизно 40 % економії дизельного палива [5]. Отже витрати на дизельне пальне для гібридного автобуса на обраний маршрут м. Харкова будуть складати 676 грн.

Якщо обрати електробус, який приводиться в рух електричним двигуном потужністю 230 кВт, то експлуатаційні затрати на один робочий день будуть значно менші. Оберемо Львівський автобус «Електрон Е 19101» який може проїхати без підзарядки до 210 км, а щоб підзарядитися на 70 % необхідно усього 15...20 хв. Тобто такий автобус якраз підходить для цього маршруту.

На автобусі «Електрон Е 19101» стоять акумуляторні батареї, ємністю 120 кВт./год. Отже на один робочий день електробус витратить 120 кВт. Ціна 1 кВт електроенергії для промислового споживання дорівнює 1,38 грн. Відповідно, на один робочий день буде витрачено 150 грн. на електричну енергію.

Електробус «Електрон Е 19101» вийде самий економний, у порівнянні з попередніми, але цей автобус використовує звичайні Li-Ion акумулятори, а їх термін служби при такій роботі, становить 3...5 років. Це є значним недоліком таких автобусів.

Пропонується обрати електробус, який використовує замість звичайних акумуляторів суперконденсатори (іоністори). Термін служби іоністорів на порядок довший, ніж Li-Ion акумуляторів (10...15 років, 500 тис. циклів заряду-розряду, а нового типу 1 млн. – це 25...30 років).

Розглянемо більш детально будову та характеристики суперконденсаторів, як накопичувача енергії для електробуса.

Ультраконденсатор (Ultracapacitors) або суперконденсатор – елемент живлення, що поєднує властивості традиційних акумуляторів і звичайних конденсаторів. Ультраконденсатори мають ємність, що наближається до ємності хімічних акумуляторів, швидкість і потужність заряду і розряду на рівні електролітичних конденсаторів.

Традиційні хімічні акумулятори мають цілий ряд переваг: більшу ємність, низькі струми витоків, малі габарити. Проте є у них і недоліки: тривалий цикл заряду, відносно невисока навантажувальна здатність, обмежене число циклів заряду-розряду. У той же час звичайні електролітичні конденсатори відрізняються набагато більшим числом циклів заряду-розряду і високою піковою потужністю віддачі.

Структура суперконденсаторів схожа на пристрій електролітичного алюмінієвого конденсатора (рисунок 2.14). Зовнішні затискачі суперконденсаторів занурені в рідкий електроліт, а на їх поверхні формований шар пористого вуглецевого покриття. Для того щоб електроди замикалися, між ними розташований проникний для електроліту сепаратор.

При додатку зовнішнього напруги електроліт поляризується, і його вільні іони переміщуються в бік протилежно заряджених електродів. При цьому, досягаючи поверхні електрода, іони не проникають в нього через електрохімічні особливості вуглецевого покриття. У результаті утворюється два електронні шари, які і є джерелом енергії, що запасається.



Рисунок 2.14 – Структура суперконденсатора

Ключовою особливістю ультраконденсаторів є унікальне вуглецеве покриття. По-перше, воно забезпечує мінімальну відстань між іонами електроліту і іонами електродів. У сучасних елементах воно складає одиниці нанометрів. По-друге, вуглецеве покриття має надзвичайно розвинену пористу структуру з розмірами менш 1 нанометра.

Ємність конденсатора визначається [15]

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (2.1)$$

де  $\varepsilon_0$  – електрична постійна ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);

$\epsilon$  – діелектрична проникність середовища;  
 $S$  – площа поверхні пластини конденсатора,  $\text{м}^2$ ;  
 $d$  – відстань між пластинами конденсатора, м.

З формули (2.1) витікає, що завдяки великій площі і малому відстані між іонами, ємність ультраконденсаторів повинна досягати вельми великих значень. Наприклад, ємність 3000 Ф вже є типовим значенням, яке наближається до ємності акумуляторів.

Таким чином, ультраконденсатори займають проміжне положення між електролітами і традиційними акумуляторами (рисунок 2.15).

Ще одною перевагою ультраконденсаторів є швидкість та передбачуваність їх циклів заряду і розряду (рисунок 2.16). Як відомо, звичайні хімічні акумулятори мають тривалий цикл заряду, який до того ж є нелінійним. З цієї причини якісні зарядні пристрої необхідно оснащувати інтелектуальними функціями, щоб дотримуватися правильну «траєкторію» заряду. Для ультраконденсаторів все значно простіше. З одного боку вони відрізняються збільшеною швидкістю заряду, а з іншого боку, сама зарядна характеристика має лінійний вигляд.

Швидкість розряду для ультраконденсаторів становить від одиниць до десятків секунд, а заряду – від одиниць секунд до декількох хвилин. Для хімічних акумуляторів цикл розряду хоча і досягає декількох годин, але після цього потрібно настільки ж тривалий процес заряду.

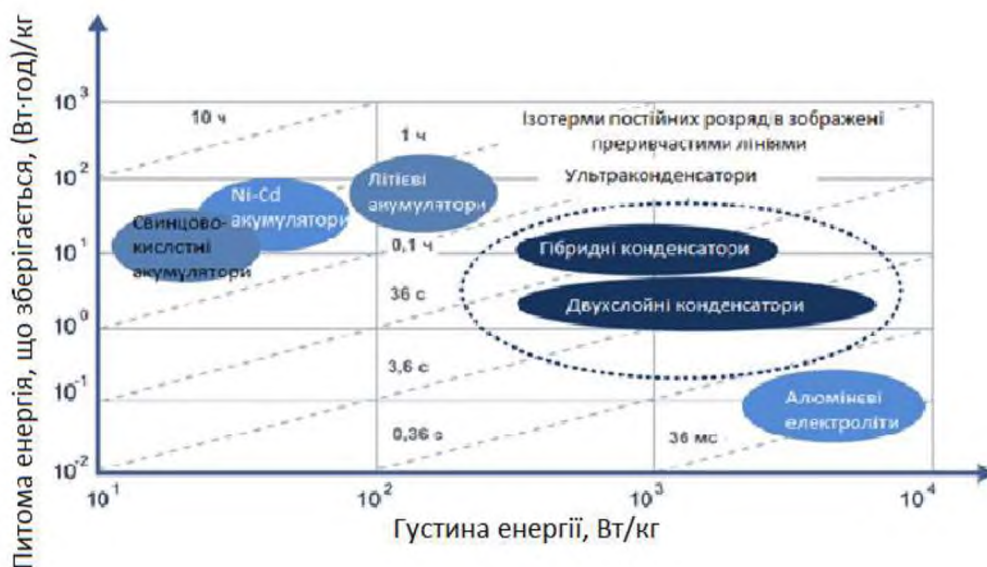


Рисунок 2.15 – Порівняння характеристик різних елементів живлення

Найважливішою перевагою ультраконденсаторів є їх тривалий термін служби, який сягає півмільйона циклів заряду-розряду. Це досягається за рахунок того, що принцип їх роботи має практично виключно фізичну складову і пов'язаний з перенесенням зарядів. При цьому не відбувається швидкої деградації матеріалів структури. На противагу цьому акумулятори, що

використовують хімічні реакції в процесі заряду і розряду, цілком очевидно схильні до неминучої деградації матеріалів. Це призводить до погіршення електричних властивостей і обмеженню терміну служби.

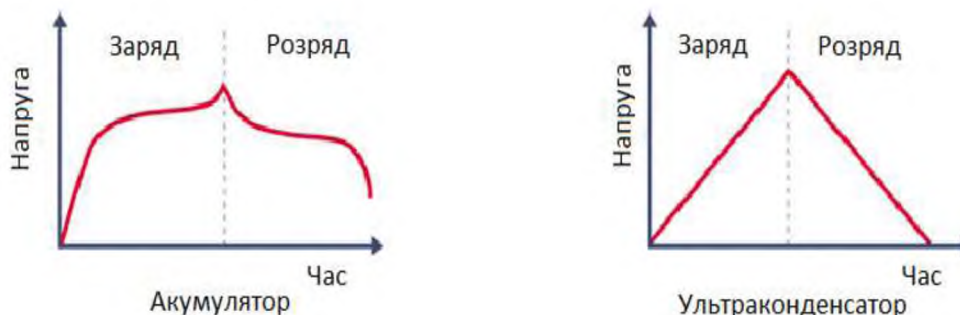


Рисунок 2.16 – Особливості циклів заряду і розряду акумулятора і ультраконденсатора

Варто сказати, що ємність ультраконденсаторів в документації, як правило, приводиться у Фарада, а ємність акумуляторів в ампер-годинах. Щоб перевести ємність ультраконденсаторах в більш звичні одиниці слід скористатися двома формулами.

Для початку розраховується енергія ( $E$ ) в джоулях (Дж)

$$E = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (2.2)$$

де  $C$  – ємність конденсатора, Ф;

$U$  – напруга між пластинами конденсатора, В.

Далі можна визначити ємність ( $e$ ) у Ватт-годинах (Вт/год)

$$e = \frac{E}{3600}. \quad (2.3)$$

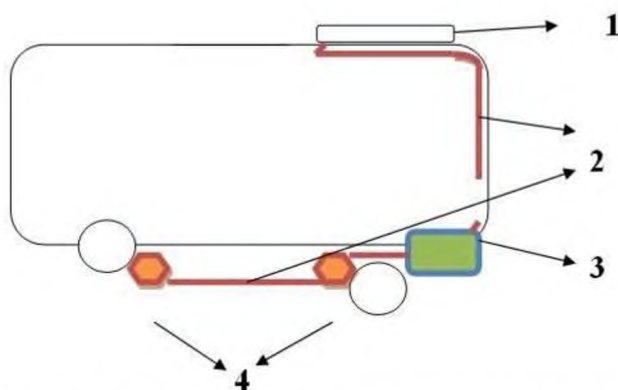
Підсумуємо переваги ультраконденсаторів:

- робоча напруга одиночних елементів до 2,85 В;
- висока ємність одиночних елементів до 3400 Ф;
- значний ресурс циклів заряду-розряду до 1 млн;
- широкий діапазон робочих температур: -40...65 °С;
- наявність одиночних циліндричних і призматичних, а також модульних конструкцій.

2.5 Технічні вимоги до компонентів силової електричної установки електробусу міського призначення

Пропонується, на базі автобуса «Богдан А091» зробити електробус у якого, на місці для двигуна, буде знаходитися блок ультраконденсаторів (3) з апаратурою управління, рисунок 2.17. Два електричні двигуни (4) розміщуються безпосередньо на осі обертання коліс, як це зображено на рисунок 2.17. Зарядний пристрій розташований на даху електробуса, що забезпечить безпечний заряд ультраконденсаторів на зупинках громадського транспорту (у відповідності до технології компанії АВВ, рисунок 2.13).

Вибір того чи іншого типу електричних машин в якості основного двигуна для електробуса не може бути проведений у відриві від вибору інших елементів тягового електроприводу. Застосування кожного типу двигунів тягне істотні зміни силового перетворювача, механічних елементів (редукторів, гальм), набору первинних вимірювачів (датчиків положення, швидкості і т.п.), а також визначає побудову системи управління.



1 – зарядний пристрій; 2 – проводка; 3 – ультраконденсатор; 4 – електричні двигуни.

Рисунок 2.17 – Схематичне зображення елементів автобуса

Як видно з таблиці 2.1, перевагою володіє асинхронний двигун з короткозамкненим ротором [16]. Даний тип двигуна пропонується використовувати в якості силового електроприводу електробуса.

Таблиця 2.1 – Сукупність експертних оцінок

Показник	Тип електричних машин			
	Електродвигун постійного струму	Асинхронний електродвигун	Синхронний електродвигун з постійними магнітами	Індукторний електродвигун
Питома потужність, кВт/год,	2	3	5	3
Коефіцієнт	2	3	5	3

корисної дії				
Керованість	5	4	4	3
Надійність	3	5	4	5
Виробництво	5	5	4	3
Ціна	3	5	2	4
Разом:	20	25	24	21

В якості накопичувача енергії використовується ємкісний накопичувач на основі модулів електрохімічних конденсаторів – суперконденсаторів. Альтернативу суперконденсаторам, застосовувану в сучасних електробусах, складають акумуляторні батареї (NiMH або Li-Ion), що мають істотно більшу питому енергію. Проте їх застосування пов'язане з обмеженням режимів заряду і розряду, а головне, вони як мінімум удвічі поступаються суперконденсаторам по ресурсу. Типовий ресурс експлуатації АКБ сучасного автобуса 5...6 років, тоді як ресурс автобуса 10...12 років. Це означає, що за час експлуатації споживач повинен буде як мінімум один раз поміняти потужну батарею, а суперконденсатори не вимагають заміни протягом усього терміну експлуатації автобуса. У таблиці 2.2 представлені порівняльні характеристики різних накопичувачів електроенергії.

На користь вибору конденсаторного типу накопичувача наявні наступні переваги:

- найвища питома вагова і об'ємна потужність;
- стійкість до значних перевантажень по напрузі і перезаряду без виходу з ладу та безпеку в експлуатації;
- низький рівень саморозряду;
- широкий діапазон робочих температур, не потребує обслуговування при експлуатації;
- висока надійність виробів, підтверджена багаторічними стендових випробувань та експлуатацією у споживачів.

Таблиця 2.2 – Порівняльні характеристики різних накопичувачів електроенергії

Тип накопичувача	Акумулятори			Електрохімічні конденсатори
	Кислотні	Лужні	Літій-іонні	
Показники				
Питома енергія, Вт·год/кг	20...40	15...80	80...220	2...10
Максимальна питома потужність, Вт/кг	100...300	500...1300	800...3000	1500... 12000
Ресурс, цикл	100...400	300...2000	500...2500	>1 млн.
Термін служби, років	2...10	2...15	3...10*	>20
Робоча температура, °С	-30...45	-40... 60	-30...60	-50...70
ККД, %	70...85	65...80	80...95	>90
Обслуговування	Потрібно		Немає	Немає

Ціна, \$ / кВт · год	50...200	500...1500	1000...2500	10000...20000
Ціна, \$ / кВт (номінальної потужності)	50...120	75...400	400... 670	50...100

\* – термін служби визначає технологія виготовлення (виробник)

Найважливіший параметр накопичувача в складі електричної силової установки – циклічний ресурс. Специфіка руху міського автобуса з частими зупинками, гальмування і прискорення вимагає від накопичувача велику кількість зарядно-розрядних циклів. Число їх залежно від інтенсивності руху становить 500...1000 циклів на добу, а за 10 років експлуатації більше 1 млн. циклів. Для того щоб досягти таких показників, сучасні акумулятори повинні працювати на невелику глибину зарядно-розрядного циклу.

У таблиці 2.3 порівнюються різні накопичувачі, призначені для міського автобуса з гібридним та електричним приводом. Як видно з таблиці, за техніко-економічними показниками ЕК виглядають краще акумуляторів. ЕК характеризуються найвищим ресурсом і терміном служби, найменшою масою, більш широким діапазоном робочих температур і не вимагають обслуговування.

Таблиця 2.3 – Порівняння накопичувачів, призначених для міського електробуса

Тип накопичувача	Вимоги	Кислотний	Лужний	Літій-іонний	ЕК
Енергія, що запасасться, кВт·год	—	20			1,0
Маса з системою охолодження, кг	<500	760...1500	400... 1600	300...500	300...600
Робоча температура, °С	—	-30...45	-40...60	-20...60	-50...70
Ресурс, млн. цикл.	>1	<0,1	<0,3	<0,15	>1
Термін служби, років	10... 12	<1	<3	<2	>10
Спосіб визначення заряду і залишкової ємності	—	Орієнтовний, потрібне спеціальне обладнання			По напрузі
Вартість комплекту, тис. грн.		7,4...29,6	240...720	74...370	74...148
Кількість комплектів за термін служби 10 років	—	>10	>3	>5	1
Вартість обслуговув., тис. грн.		7,41...29,6	14,8...44,4	—	—
Загальна вартість, тис. грн.		150...590	280...800	740...1850	93...150

Вартість акумуляторів будь-якого типу (особливо Li-Ion батарей), використовуваних протягом усього періоду експлуатації автобуса, істотно перевищує вартість ЕК.

Свинцево-кислотні акумулятори, незважаючи на високу вартість, мають неприйнятно малий ресурс і вимагають серйозного обслуговування, що призводить до великої сумарної вартості накопичувача. У кислотних АКБ є і ряд інших недоліків: низька надійність (характерне явище «раптова відмова»), велика маса і обсяг (додаткова невиправдана витрата палива), ненадійна робота при негативних температурах, погано сприймається заряд, низький ККД в циклі заряд/розряд. Другим недоліком є наявність отруйного свинцю і кадмію, які використовуються в кислотних і деяких лужних акумуляторах.

В якості силових перетворювачів пропонується використовувати інтелектуальні інтегральні модулі трифазного мостового перетворювача SKAI фірми Semikron [16]. До складу силового інтелектуального модуля входять силові ключі на IGBT-транзисторах з антипаралельними FRD-діодами, схеми захисту силових ключів і формувачі імпульсів управління (інтелектуальні драйвери), конденсатор шини постійного струму, датчики струму, напруги та температури. Силові ключі і технологія притискного контакту фірми Semikron мають кращі характеристики у своєму класі і кращі показники надійності, стійкості до енерготермоциклів, що особливо важливо для транспортних застосувань. Модуль має надзвичайно малу внутрішню паразитну індуктивність, що дозволяє будувати на ньому перетворювач з підвищеною напругою ланки постійного струму (до 900 В при IGBT на 1200 В). Унікальна конструкція модуля SKAI, спеціально розробленого для застосування в системі тягового приводу на автотранспорті, має краще співвідношення ціни та якості і дозволяє будувати перетворювач з можливістю зміни напрямку передачі потужності.

## 2. Розрахунок енергетичних показників міського транспорту з блоком накопичення енергії на іоністорах

Для робочого циклу руху для міського транспорту розгін / пробіг / гальмування / стоянка, за умови руху транспортного засобу по замкнутому маршруту енергія, необхідна для розгону транспортного засобу включає тільки кінетичну енергію розгону з урахуванням втрат

$$E_1 = \frac{m \cdot V_1^2}{2K_u} \quad (2.4)$$

Доступна для рекуперації енергія становить

$$E_2 = \frac{K_u \cdot m \cdot V_1^2}{2}, \quad (2.5)$$

де  $m$  – маса транспорту;

$K_u$  – сумарний коефіцієнт, що враховує всі втрати при русі транспорту;

$V_1$  – швидкість транспорту після розгону.

Розрахунок ефективності рекуперації.

Ефективність рекуперації можна представити як відношення енергії рекуперації до енергії, необхідної на розгін транспортного засобу

$$EF = \frac{E_2}{E_1}. \quad (2.6)$$

Для робочого циклу руху міського транспорту, ефективність рекуперації при наявності накопичувача можна представити у вигляді

$$EF = \frac{\varphi \cdot \eta \cdot K_u^2 \cdot V_2^2}{V_1^2}, \quad (2.7)$$

де  $\eta$  – ККД роботи накопичувача в циклі заряд-розряд;

$\varphi$  – ККД роботи DC/DC перетворювача;

$V_2$  – швидкість транспорту після вибігу.

Враховуючи, що в розглянутому циклі руху енергоспоживання необхідно тільки на розгін транспортного засобу, отримуємо

$$E_{пт} \cdot S = \frac{m \cdot V_1^2}{2K_u},$$

звідки

$$K_u = \frac{V_1^2}{2E_{пт} \cdot S}, \quad (2.8)$$

де  $E_{пт}$  – питоме енергоспоживання транспорту,

$S$  – довжина маршруту в циклі.

Т.я. тролейбуси мають такі ж електротехнічні умови експлуатації, як і розглянутий міський електробус, то для порівняння будемо спиратися на даний вид транспорту.

Досвід експлуатації тролейбусів по міському маршруту ( $S \sim 350$  м,  $V_1 \sim 45$  км/год, час розгону 20...25 с, час циклу  $\approx 60$  с) дає величину  $E_{пт} = 85 \dots 100$  Вт·год/(т·км).

Підставляючи відповідні величини у вираз (8) отримаємо:  $K_u = 0,65$ .

Як правило, для тролейбусів  $V_2/V_1 = 0,85$ .

Беручи  $\varphi = 0,95$  и  $\eta = 0,8$ , ефективність рекуперації, дорівнює

$$EF = \frac{\varphi \cdot \eta \cdot K_u^2 \cdot V_2^2}{V_1^2} = 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,65^2 \cdot 0,85^2 = 0,23.$$

Визначення параметрів накопичувача енергії

Розрахункова енергія, необхідна для розгону автобуса з масою 8 т до швидкості 55 км/год, складе, МДж

$$\frac{m \cdot V_1^2}{2K_u} = \frac{800 \cdot 15,3}{2 \cdot 0,65} = 1,44.$$

При ефективності рекуперації  $EF = 0,23$  енергія, яка може бути зекономлено в кожному робочому циклі складе, МДж

$$E_{рек} = 1,44 \cdot 0,23 = 0,33.$$

Необхідна енергія для здійснення циклу з урахуванням рекуперації складе, МДж

$$E_{цик} = 1,44 - 0,33 = 1,11.$$

Середня потужність електродвигуна на розгоні для забезпечення часу розгону 25 с повинна становити, кВт

$$P_{ср} = 1,44 / 25 = 57,6.$$

Для того щоб конденсатор забезпечив розгін автобуса протягом всього необхідного часу (25 с), то енергія, що віддається при розряді повинна становити не менше  $57,6 \text{ кВт} = 1,425 \text{ МДж}$ .

При гальмуванні накопичувач може отримати лише 0,33 МДж.

Згідно з проведеними розрахунками визначаємо технічні вимоги для компонентів електричної силової установки у складі міського автобуса Богдан А091, таблиці 2.4...2.6.

Таблиця 2.4 – Технічні вимоги для електробуса Богдан А091

Найменування	Значення
Номінальна потужність електродвигуна, кВт	60
Максимальна потужність електродвигуна, кВт	120 (2x60)
Номінальна потужність накопичувача, кВт	90
Енергія накопичувача при номінальній потужності, МДж	>1,44
Ресурс, цикл	>1 000 000
ККД в циклі заряд/розряд ( $\eta$ ), не менше	0,8
Термін служби, років	10
Максимальний пробіг за рахунок енергії накопичувача, км	до 5

Таблиця 2.5 – Накопичувач на основі ЕК для електричного приводу міського автобуса Богдан А091

Найменування	Значення
Модель накопичувача	14×30ЄК404
Напруга, В	630
Ємність, Ф	28,6
Об'єм, л	420
Маса, кг	520
Номинальна потужність, кВт	90
ККД (Ed/Es) в циклі заряд/розряд ( $\eta$ )	> 0,8
Конденсаторний модуль	30ЄК404
Напруга, В	45
Ємність, Ф	400
Внутрішній опір, мОм	12
Маса, кг	37
Габаритний розмір, мм	560x219x245
Робоча температура, °С	-50...+70

Таблиця 2.6 – Характеристики міського автобуса Богдан А091з електроприводом

Найменування	Значення
Довжина, м	7,2
Повна маса, т	8
Пасажиромісткість, чол.	45
Номинальна потужність тягового електродвигуна, кВт	60
Габаритний обсяг, л	420
Маса, кг	520
Максимальна швидкість, км/год	70
Час розгону до швидкості 50 км/год, с	25
Середня ефективність рекуперації	0,23
Середня питома витрата енергії, Вт·год/(т·км)	80...84
Максимальний пробіг за рахунок енергії накопичувача км	до 5

Розрахунки показують, що для того, щоб підзарядить блок суперконденсаторів електробуса, необхідно буде встановити п'ять зарядних пристроїв на обраному маршруті («Пролетарська» – «Проспект Гагаріна», маршрут № 147, м. Харків). Розрахований час заряду суперконденсаторів буде складати від декількох секунд (20...30 с) до декількох хвилин (до 5 хв). Цей час визначається потужністю зарядного пристрою.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гібридні автомобілі: [монографія] / [О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков та ін.]; Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Х.: Крок, 2008. – 327 с.
2. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика: [монографія] / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков, В.Я. Двадненко; Харк. нац. автомобільно-дорожній ун-т. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 236 с.
3. Автобус // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Автобус>.
4. Гібридні автобуси Volvo // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: [http://volvo.infocar.com.ua/news\\_44205.html](http://volvo.infocar.com.ua/news_44205.html).
5. Автобус "Вітовт" А-420 // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://www.avtonemirov.com/novosti/novinki-avtomira/334-gibridnyj-vitovt-a420-luchshij-gorodskoj-avtobus-srednego-klasa-v-rossii>.
6. Гібридний автобус Богдан А705 // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://newsone.ws/cars/ukrainskiy-bogdan-predstavil-gibridnyy-avtobus-13-01-2014>.
7. Електробус BYD K9 // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://internetua.tv/index.php/press-releases/3120-byd-5.html>.
8. Електробус з Гонконгу // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://www.scmp.com/news/hong-kong/economy/article/1872155/first-hong-kong-designed-electric-bus-hits-citys-roads-month>.
9. Львівський електробус «Електрон» // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: [http://vgolos.com.ua/photo/elektron\\_vypustyv\\_dlya\\_lvova\\_pershyy\\_elektron\\_vypustyv\\_dlya\\_lvova\\_pershyy\\_v\\_ukraini\\_elektrobus\\_197941.html](http://vgolos.com.ua/photo/elektron_vypustyv_dlya_lvova_pershyy_elektron_vypustyv_dlya_lvova_pershyy_v_ukraini_elektrobus_197941.html)
10. Автобус компанії Proterra Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://rodovid.me/ecotransport/proterra-elektricheskiy-vtobus.htm>  
<http://infoal.tatcenter.ru/news/150395/>.
11. Концерн МВС Bus & Coach // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://tdrusavto.ru/?news=sitea-electric-perviy-elektroavtobus-ot-vdl-bus-coach>.
12. Електроавтобус ГАЗ // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <https://www.drive2.ru/c/340969/?page=0>.
13. Електроавтобус з швидкою зарядкою // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://autonews.autoua.net/novosti/11004-kitajcy-sozdali-elektroavtobus-so-sverhbystroj-zar.html>.
14. Запуск автоматичної системи швидкої зарядки // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://ecotown.com.ua/news/V-Lyukseburzi-vstanovyly-robotu-dlya-shvydkoyi-zaryadky-elektroavtobusiv>.

## Лекція № 16 (2 год.)

### Тема 6. Перетворювачі струму для електричного автотранспорту та систем накопичення електроенергії

#### 1. Перетворювачі струму для електричного автотранспорту

Нагадаю, що умовно в електромобілі можна виділити 3 основні складові елементи (системи): джерело енергії, рухова і допоміжна системи.

На попередніх лекціях ми розглянули ...

У цій лекції ми будемо говорити про перетворювачі струму.

Дивіться, акумулятори накопичують енергію у вигляді заряду постійного струму. Але так як, більшість двигунів працює на змінному струмі, енергію необхідно перетворити. Така необхідність виникає і коли енергія подається назад в батарею, тобто при рекуперативному гальмування.

Крім цього, електроенергія, що виробляється ходовим електродвигуном, має високу напругу (зазвичай більше 100 В). Щоб цю енергію зберегти в акумуляторі, напругу необхідно знизити до рівня, що використовується в звичайних акумуляторах (12 або 24 В).

Для цих цілей використовуються різні перетворювачі напруги постійного струму і інвертори. Сьогодні ми і розберемо основні перетворювачі енергії, які використовуються в електромобілях і гібридах.

На рисунку 1 зображена загальна конфігурація EV і HEV. Тут можна побачити, що існують три основних силових електронних блоки: DC-DC перетворювач; DC-AC інвертор і AC-DC випрямляч

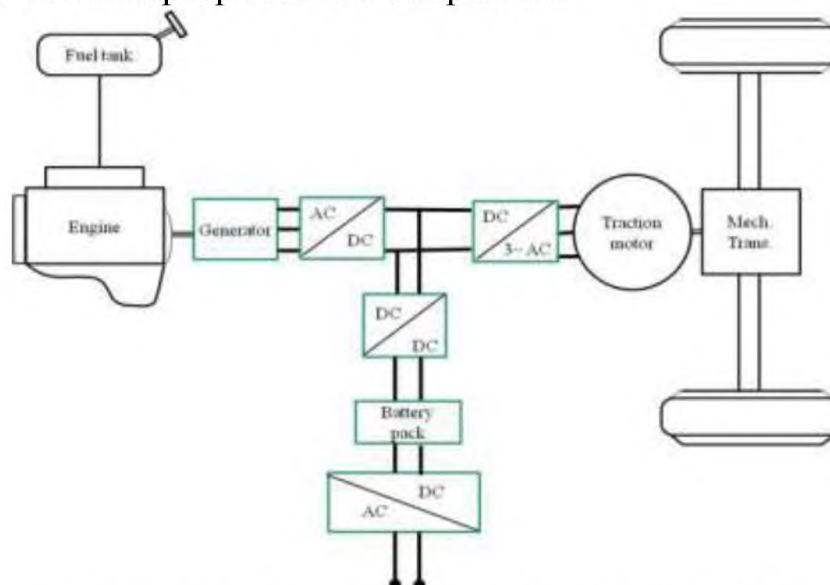


Рис. 1: General Configuration of a Electric Vehicle

#### 2. Інвертор DC-DC для електричного автотранспорту

Давайте почнемо з DC-DC перетворювачів. Основним завданням подібних пристроїв є змінювання напруги (змінного або постійного струму) джерела електроживлення. За топологією існує 3 типи перетворювачів напруги:

1. Бак-конвертер: на малюнку 2а показаний бак-конвертер. Бак конвертер є понижуючим перетворювачем і він видає більш низьку середню вихідну напругу, ніж вхідна напруга постійного струму.

2. Підвищуючий перетворювач: на малюнку 2b показаний підвищує перетворювач. У нього вихідна напруга завжди більша, ніж вхідна.

3. Buck-Boost конвертер: на малюнку 2c показаний Buck-Boost конвертер. Він може використовуватися як в якості підвищуючого перетворювача потоку потужності від батареї до ланцюга постійного струму, так і в якості понижуючого перетворювача, коли потік змінюється на зворотний.

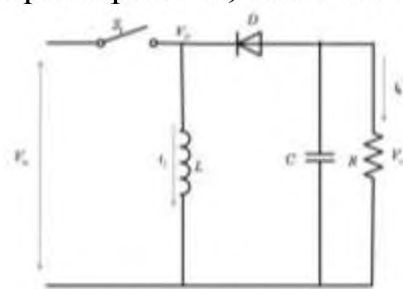


Figure 2c: General Configuration Buck-Boost Converter

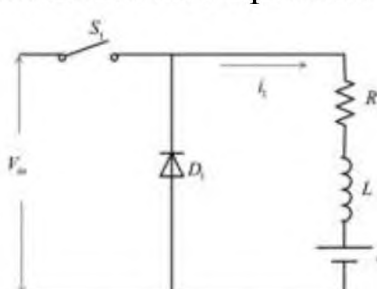


Figure 2a: General Configuration Buck Converter

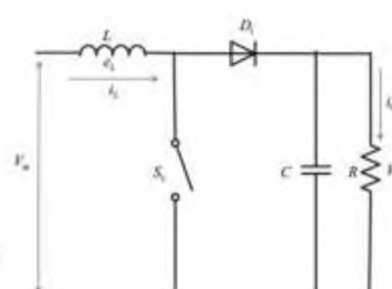


Figure 2b: General Configuration Boost Converter

Найбільш поширені DC-DC перетворювачі, що використовуються в HEV або EV можна класифікувати за напрямком електричних параметрів, що перетворюються:

1. Однонаправлені перетворювачі: вони обслуговують різні бортові навантаження, такі як датчики, органи управління, розважальні, комунальні та захисні пристрої.

2. Двонаправлені перетворювачі: вони використовуються в місцях, де потрібен заряд акумулятора (пряме перетворення) і при рекуперативному гальмування (зворотне перетворення). Потік потужності у двонаправленом перетворювачі зазвичай йде від низької напруги, такої як батарея або суперконденсатор, до стороні високої напруги і називається операцією підвищення напруги. Під час рекуперативного гальмування потужність повертається назад в шину низької напруги, щоб зарядити батареї, тобто протікає робота в режимі зниження напруги.

### 3. Інвертор DC –AC для електричного автотранспорту

Тепер давайте розглянемо DC -AC інвертори. Отже, основним джерелом електроенергії є акумулятор, який є джерелом постійного струму. Вихідні електричні параметри постійного струму батареї підвищуються або знижуються відповідно до вимоги, за допомогою інвертора DC-DC. Але струм все ще залишається постійним, в той час як тяговий електродвигун вимагає від джерела

змінний струм. Тому, виникає необхідність в використанні ще одного перетворювача енергії, який називається DC -AC інвертор.

Функція інвертора – змінити вхідну напругу постійного струму на асиметричну вихідну напругу змінного струму бажаної величини і частоти. Форма хвилі вихідної напруги ідеальних інверторів повинна бути синусоїдальною. Однак форми сигналів практичних інверторів не синусоїдальні і містять певні гармоніки.

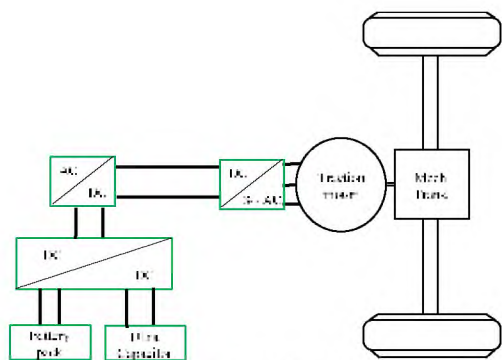
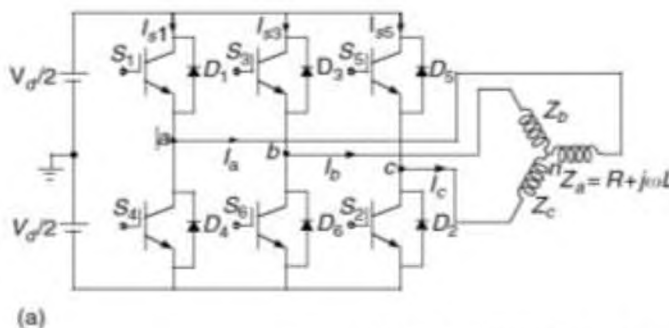


Figure 1: Configuration of electric vehicle [1]



(a)

DC/AC inverter topology

#### 4. Випрямляч AC- DC

Випрямляч – це пристрій, схожий на інвертор DC -AC, за винятком того, що він виконує зворотне перетворення потужності змінного струму в потужність постійного струму.

##### *Підсумок*

Основним завданням DC-DC конвертера є перетворення напруги. Тобто це електричний пристрій, який фактично змінює напругу джерела електроживлення. Він його або підвищує, або знижує.

Інвертор DC -AC – це електричний пристрій, що перетворює електроенергію, одержувану від джерела постійного струму, в змінний того типу, який можна використовувати для управління пристроєм або електричними побутовими приладами.

Випрямляч може конвертувати змінну напругу генератора в постійну напругу для заряду акумулятора. Перетворювачі постійного струму в змінний і перетворювачі постійного струму часто об'єднуються з іншими електронними компонентами системи в модулі силової електроніки.

Це базова інформація по даній темі. Більш детально розглядати перетворювачі струму і принцип їх роботи ми можливо і будемо, але не в рамках даного курсу.

## Лекція № 17 (2 год.)

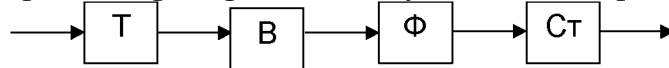
### Тема 6. Перетворювачі струму для електричного автотранспорту та систем накопичення електроенергії

#### 1. ОСНОВИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ В ПОСТІЙНИЙ, ОСНОВНІ РОЗРАХУНКОВІ СПІВВІДНОШЕННЯ

Цілий ряд споживачів електричної енергії в сучасній радіоелектронній апаратурі вимагають для свого живлення постійний струм різних номіналів. У той же час державна мережа, а також ДЕС як правило є джерелом змінного Струму. Для одержання постійного струму необхідної якості із змінного струму що надходить, використовуються т.зв. вторинні джерела електроживлення.

До складу вторинних джерел електроживлення, як правило, входять:

Трансформатор, випрямляч, фільтр що згладжує, стабілізатор



Трансформатор використовується для одержання напруги необхідної величини і гальванічної розв'язки.

**Випрямляч** - для перетворення змінної напруги в пульсуючу напругу.

**Фільтр, що згладжує** - для фільтрації пульсацій

**Стабілізатор** - для підтримки, незмінною, напруги на навантаженні, при коливаннях навантаження і вхідної напруги.

Основу випрямляча складають один або декілька з'єднаних елементів з односторонньою провідністю - вентилів.

Випрямлячі класифікуються по типу вентиля і схемі випрямлення, а також по величині випрямленої напруги і корисної потужності.

По типу вентиля:

- **3 електронними вентилями** - кенотронні (електровакумний діод(високі напруги))
- **3 іонними вентилями** - газотронні, ртутні (газорозрядні 2-х електродні прилади з несамоіскриючим дуговим розрядом, наповнені інертним газом або парами ртуті)
- **3 напівпровідниковими вентилями** (селенові, германієві, кремнієві)

**Схеми випрямлення класифікують по ряду характерних ознак:**

1. У залежності від числа фаз джерела змінного струму, що визначають число  $m_1$  фаз, первинного кола трансформатора (кількість первинних обмоток) розрізняють схеми випрямлення

- Однофазні ( $m_1 = 1$ )
- Трифазні ( $m_1 = 3$ )

2. У залежності від числа фаз  $m_2$  вторинного кола трансформатора (кількості вторинних фазних обмоток):

- Однофазні ( $m_2 = 1$ )
- Двофазні ( $m_2 = 2$ )
- Трифазні ( $m_2 = 3$ )
- Шестифазні ( $m_2 = 6$ )

Перший і другий ознаки дозволяють дати характеристику силовому трансформатору, як перетворювачу числа фаз.

3. У залежності від способу підключення навантаження до вторинних обмоток трансформатора:

- Нульові схеми випрямлення (НСВ)
- Мостові схеми випрямлення (МСВ)

По способу перетворення Змінного струму в постійний пульсуючий струм розрізняють:

- Однотактні (однапівперіодні) схеми випрямлення ( $q = 1$ )
- Двотактні (двонапівперіодні) схеми випрямлення ( $q = 2$ ).

*Всі нульові схеми випрямлення є однотактними, а усі мостові двотактними.*

У однотактних схемах, струм у фазній обмотці трансформатора тече протягом одного напівперіоду (такту) що перетвориться напруги або його частини. У двотактних схемах випрямлення струм у фазній обмотці трансформатора тече протягом двох напівперіодів напруги що перетворюється або їх частин.

По числу фаз випрямлення (кількості пульсацій випрямленої напруги  $U_0$  за період  $T$  живлячої мережі  $U_1$ ) розрізняють схеми випрямлення:

- Однофазні ( $m = 1$ )
- Двофазні ( $m = 2$ )
- трифазні ( $m = 3$ )
- Шестифазні ( $m = 6$ )
- дванадцятифазні ( $m = 12$ )

Під числом  $m$  розуміють добуток

$$m = m_2 \cdot q.$$

*Процес почергового підключення вентилів вторинних обмоток фаз до навантаження називається комутацією.*

Схема напівпровідникового перетворювача, у котрої один вивід постійного Струму є нульовою точкою трансформатора або мережі Змінного Струму, а іншій з'єднаними разом катодами або анодами називається НУЛЬОВОЮ СХЕМОЮ.

*Схеми напівпровідникових перетворювачів у який перетворюються обидва напівперіоди змінної напруги, є двонапівперіодними.*

Двонапівперіодні схеми напівпровідникових перетворювачів, що містять дві і більш пари плечей перетворювача, середні виводи яких є виводами змінного струму, а крайні виводи з однаковою полярністю, з'єднані разом є виводами постійного струму, називаються **мостовими схемами** перетворення.

У мостових схемах приймач електроенергії підключається до фази трансформатора так, що струм у вентиляній обмотці за період струму що випрямляється тече в двох напрямках.

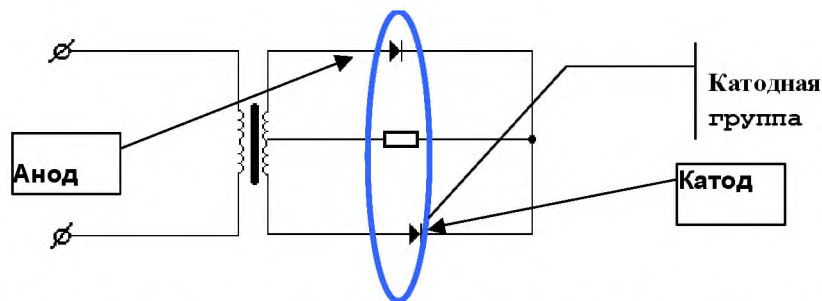
*Плечем напівпровідникового перетворювача називається ділянка електричного кола, що містить один, або декілька одночасно провідних приладів, що працюють у ключовому режимі, і при необхідності інші компоненти кола.*

У випрямлячах вентилялі з'єднуються в катодну або анодну групи.

Якщо усі вентилялі приєднуються до обмоток фаз анодами, а їхні катода з'єднуються в одну точку то така група вентилів називається **катодною**. **Загальна точка катодів є позитивним полюсом для приймачів електроенергії, а точка вторинної обмотки трансформатора з нульовим потенціалом (нульова точка) - негативним.**

Якщо усі вентилялі приєднуються до обмоток фаз катодами, а їхні аноди з'єднуються в одну точку то така група вентилів називається **анодной**. **Загальна точка анодів є негативним полюсом для приймачів електроенергії, а точка вторинної обмотки трансформатора з нульовим потенціалом (нульова точка) - позитивним.**

ПРИКЛАД:

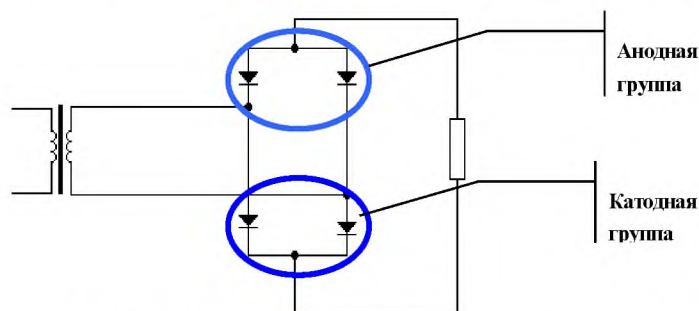


Схеми з катодною групою називаються схемами з загальним катодом, а схема з анодною групою схемою з загальним анодом.

У двотактних (мостових) схемах до вторинної обмотки трансформатора підключаються дві комутаційні групи вентилів (із них одна з загальним катодом, а інша з загальним анодом і приймач електричної енергії включений між катодом і анодом.

До кожної обмотки фази один вентиль, що входить у катодну групу, приєднується анодом, а інший вентиль вхідний в анодну групу - катодом.

Мостові схеми є двотактними, тому що струм у кожній фазі їхньої вентильної обмотки проходить у двох напрямках: при роботі вентиля катодної групи струм спрямован від нульової точки трансформатора до загальної точки катодів вентилів, а при роботі вентилів анодної групи - від загальної точки анодів вентилів до нульової точки трансформатора.



У катодній групі проводить той діод у якого анодна напруга вище інших. Комутація вентилів катодної групи відбувається в той момент, коли напруга фази, що вступає в роботу, стає або рівною напрузі працюючої фази або більше неї. У анодній групі проводить той діод у який напруга катода найменше. Комутація вентилів анодної групи виникає в той момент, коли напруга фази, що вступає в роботу, стає або рівною напрузі працюючої фази, або менше неї. *Загальний катод завжди є плюсовим, а загальний анод мінусовим виводом схеми випрямлення.*

#### Електричні параметри схем випрямлення

Напівпровідникові перетворювачі змінного струму в постійний мають цілий ряд параметрів, що характеризують їхні експлуатаційні властивості. При розробці і проектуванні ці параметри вважаються розрахунковими.

При аналізі схем Випрямлячів і розрахунку параметрів їхніх елементів (обмоток трансформатора, вентилів) вихідними величинами є номінальна випрямлена напруга  $U_{dн}$ , номінальний випрямлений струм  $I_{dн}$  і напруга живлячої мережі  $U_1$ .

У процесі аналізу схеми визначаються наступні величини.

- Середні значення випрямленого Струму і напруги  $U_d$  і  $I_d$ ;
- Діюче значення вторинної обмотки фази трансформатора  $U_2$
- Коефіцієнт пульсації випрямленої напруги  $K_n$  й інші.

Для нульових схем із числом фаз вторинної обмотки  $m_2$  ( $m_2 \geq 2$ ) середні значення випрямленої напруги і Струму визначається відповідно по формулах

$$U_d = \frac{m_2 \sqrt{2} U_2}{\pi} \sin \frac{\pi}{m_2};$$

$$I_d = \frac{U_d}{R_H} = I_{2m} \frac{m_2}{\pi} \sin \frac{\pi}{m_2}$$

Для мостових схем випрямлення

$$U_d = \frac{m_2 \sqrt{2} U_{2л}}{\pi} \sin \frac{\pi}{2m_2} = \frac{4m_2 \sqrt{2} U_2}{\pi} \sin \frac{\pi}{m_2} \sin \frac{\pi}{2m_2}$$

$$I_d = \frac{U_d}{R_H} = \frac{2m_2}{\pi} I_{2mл} \sin \frac{\pi}{2m_2} = \frac{4m_2}{\pi} I_{2m} \sin \frac{\pi}{m_2} \sin \frac{\pi}{2m_2}$$

Коефіцієнт пульсацій схеми Випрямляча являє собою відношення амплітуди гармоніки пульсацій до середнього значення випрямленої напруги

$$K_{II} = \frac{U_m}{U_d}$$

Однонапівперіодної (нульовий) схеми

$$K_{II1} = \frac{U_{m(k=1)}}{U_d} = \frac{1,57 U_d}{U_d} = 1,57.$$

У загальному випадку

$$K_{IIk} = \frac{2}{(km)^2 - 1} \cdot 100 \quad [\%]$$

Для мостовий

$$K_{nk} = \frac{2}{(2km)^2 - 1} \cdot 100 \quad [\%]$$

Для будь-якої схеми випрямлення справедлива формула

$$K_{II1} = \frac{\Delta U_d}{2U_d} = \frac{u_{0\max} - u_{0\min}}{2U_d}.$$

де  $u_{0\max}$ ,  $u_{0\min}$  відповідно максимальне і мінімальне значення випрямленої напруги.

Коефіцієнт використання вентилів по напрузі і Струму

$$K_{VU} = \frac{U_d}{U_{обр.\max}},$$

$$K_{VI} = \frac{I_{Vd}}{I_d}.$$

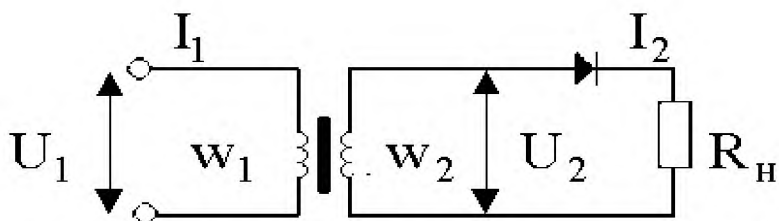
Коефіцієнт випрямлення:

$$K_\sigma = \frac{U_d}{U_2}$$

Чим вище  $K_\sigma$ , тим більше ефективно здійснюється схемою випрямлення процес перетворення Змінного Струму в постійний пульсуючий струм.

## 2. ДІОДНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ОДНОФАЗНОГО ЗМІННОГО СТРУМУ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ, ЩО В НИХ ВІДБУВАЮТЬСЯ

**Однотактна 1 фазна схема випрямлення.**



$$\begin{aligned} m_1 &= 1; \\ m_2 &= 1; \\ \text{НСВ} \\ q &= 1; \\ m &= 1. \end{aligned}$$

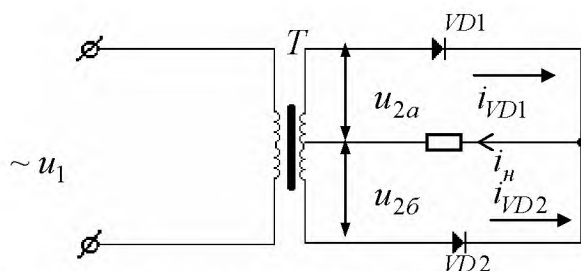
$$\begin{aligned} K_{\text{пл}} &= 1,57 \\ K_{\text{VU}} &= 0,32; \\ K_{\text{VI}} &= 1 \\ K_{\text{B}} &= 0,18. \end{aligned}$$

Однотактна 1 фазна схема є найпростішою схемою Випрямляча, її склад видно з рисунка.

Робота схеми. Під час першого напівперіоду на аноді діода «+» а на катоді «-». Діод відкрито всю напругу виділиться на навантаженні. У час другого напівперіоду діод (вентиль) закритий струм не тече, уся напруга падає на діоді.

Переваги: простота, малі габарити, висока надійність, мала вартість.

Недоліки: великі пульсації випрямленої напруги, наявність постійного підмагнічування трансформатора (підвищені втрати і збільшення розмірів трансформатора.)



$$\begin{aligned} m_1 &= 1; \\ m_2 &= 2; \\ \text{НСВ} \\ q &= 1; \\ m &= 2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{\text{пл}} &= 0,67 \\ K_{\text{VU}} &= 0,32; \\ K_{\text{VI}} &= 0,5 \\ K_{\text{B}} &= 0,9. \end{aligned}$$

Однотактна 2 фазна (нульова) схема випрямлення.

Робота схеми. Особливістю схеми, є наявність серединного відводу обмотки трансформатора, що іменується нульовою точкою. Оскільки навантаження підключене до цієї точки, то роботу схеми будемо розглядати відносно її. Допустимо в початковий момент часу струм тече по напрямку збіжному із струмом  $i_{VD1}$  тоді, діод  $VD2$  його пропускати не буде і струм потече через навантаження до нульової точки трансформатора. У наступний напівперіод ситуація зміниться на протилежну - струм потече через діод  $VD2$ , навантаження до нульової точки. Тік буде текти по черзі по плечах схеми, однак у навантаженні він буде одного напрямки. Однак напруга на замкненому діоді буде в два рази більше чим на навантаженні.

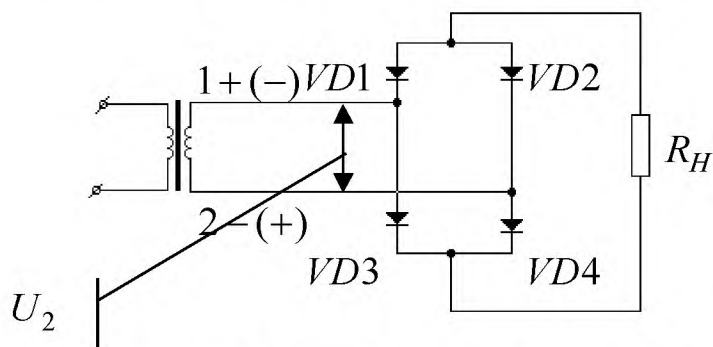
Переваги схеми:

Використовуються обидва напівперіоди синусоїдальної напруги, немає підмагнічування тра.

Недоліки:

Подвійна напруга на замкненому діоді.

3.2.3. Двотактна, однофазна (мостова) схема випрямлення.



$$\begin{aligned} m_1 &= 1; \\ m_2 &= 1; \\ \text{НСВ} \\ q &= 2; \\ m &= 2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{\text{пл}} &= 0,67 \\ K_{\text{VU}} &= 0,64; \\ K_{\text{VI}} &= 0,5 \\ K_{\text{B}} &= 0,9. \end{aligned}$$

Схема містить трансформатор і чотири вентиля, зібрані за схемою моста. До однієї діагоналі моста підводиться  $U_2$ , у другу включається навантаження ( $R_H$ ). При позитивному напівперіоді (1+)  $VD_2, VD_2$ - відкриті. Протягом негативної півхвилі, (1-), відкриті  $VD_4, VD_1$  Як у першому, так і в другому напівперіодах, струм через навантаження тече в однім напрямку.

Переваги:

- Вдвічі менше зворотний опір на діодах.
- Вдвічі менше  $U_2$  для одержання заданого значення  $U_{ср.в.}$ .
- Завдяки великому вхідному опоріві схема може бути включена в мережу і без трансформатора.

#### Недоліки:

- 4 вентиля
- втрати більше чим у попередніх схем

### 3. ДІОДНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТРИФАЗНОГО ЗМІННОГО СТРУМУ

Оскільки трифазна мережа є дуже поширеною, то з'являється можливість одержувати випрямлений струм із 3-х фазного. У Однотактних і двотактних схемах випрямлення за рахунок ефекту «перекриття фаз» струм у фазній обмотці трансформатора тече протягом частини одного або двох напівперіодів одночасно.

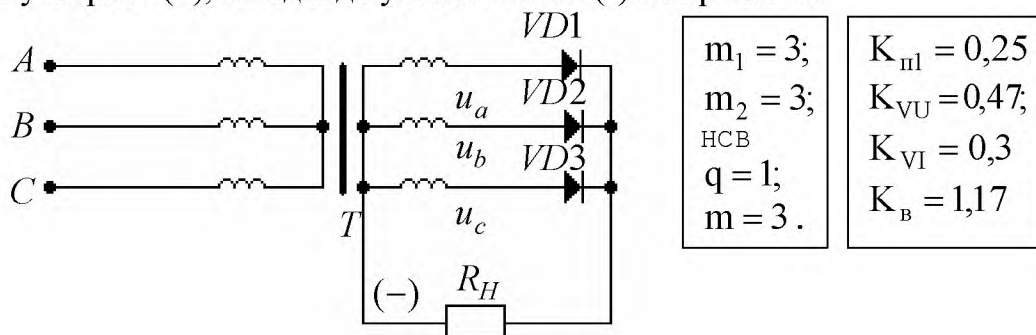
#### Аналіз електромагнітних процесів у 3-х фазній схемі випрямлення.

Для аналізу електромагнітних процесів у трифазній схемі випрямлення необхідно:

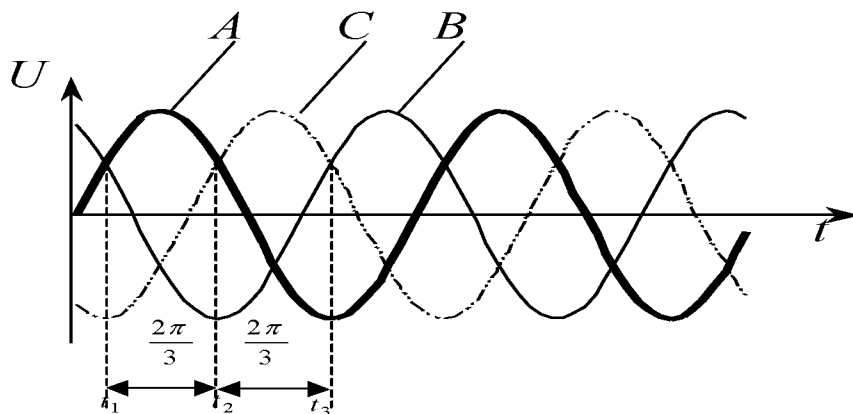
- вибрати для розгляду конкретний момент часу (накласти обмеження  $\omega t = \omega t_1 = const$ );
- визначити для розглянутого моменту фази що перетвориться напруги, у котрої найбільшу негативну напругу
- за схемою випрямлення визначити групи умикання вентилів, що входять до складу схеми і сформулювати умову провідності діода в кожній групі.
- За схемою випрямлення визначити конкретні діоди, для яких у даний момент часу виконуються умови провідності, і показати коло протікання Струму навантаження;
- Зняти обмеження по  $\omega t$  і розглянути процес у динаміку за декілька періодів що перетвориться напруги.

#### Трифазна Однотактна (нульова) схема випрямлення

Трифазний Випрямляч із виводом нульової точки трансформатора є однонапівперіодним Випрямлячем трифазного Змінного Струму. Він складається із силового трансформатора, у коло вторинних обмоток якого включені 3 діоди. Катоди діодів з'єднані разом. Вивід від загальної точки катодів утворить (+), вивід від нульової точки (-) Випрямляча.

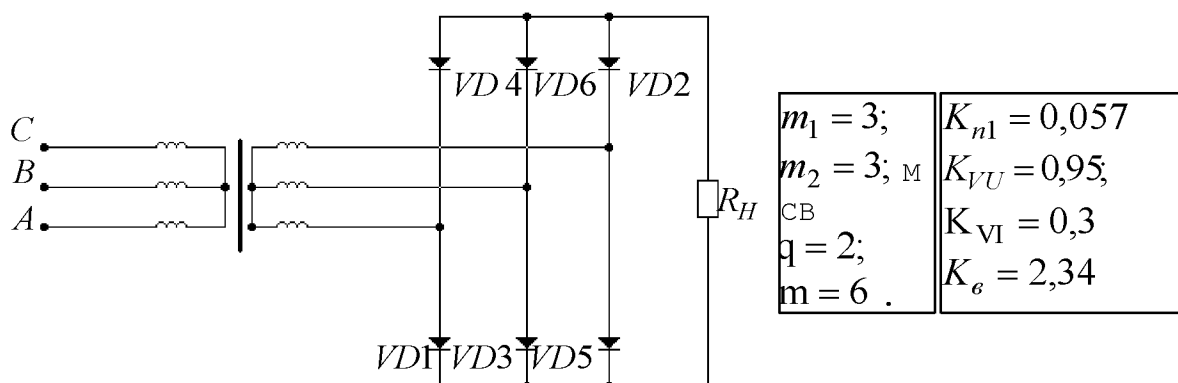


Робота схеми.



У момент  $t_0 = 0$ ; найбільша напруга має фаза  $C$ , а найменше фаза  $B$ . Напруга фази  $A = 0$ . Внаслідок цього напруга на аноді діода  $VD3$  буде найбільшим, а на діоді  $VD2$  найменшим, а на аноді  $VD1$  буде дорівнює 0. У результаті цього діод  $VD3$  буде відкритий, а  $VD1, VD2$  будуть закриті. Тік буде текти по колу  $C, VD3, R_H$ , нульова точка. Тік буде текти через діод  $VD3$  до моменту часу  $t_1$ , починаючи з якого найбільший позитивний потенціал буде мати анод діода  $VD1$ . По цьому з цього моменту починає працювати фаза  $A$  і струм потече по колу  $A, VD1, R_H$ , нульова точка.

У момент часу  $t_2$  діод  $VD1$  закриється і відчиниться діод  $VD2$ . При цьому починає працювати фаза  $B$ . Починаючи з моменту часу  $t_3$  знову буде працювати фаза  $C$ .



#### Трифазна двотактна схема випрямлення

У запропонованій схемі в будь-який момент часу до навантаження прикладена лінійна напруга через пару відкритих діодів, на аноді одного з яких потенціал найбільше позитивний, а на катоді іншого найбільше негативний.

### 4. ТИРИСТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ В ПОСТІЙНИЙ.

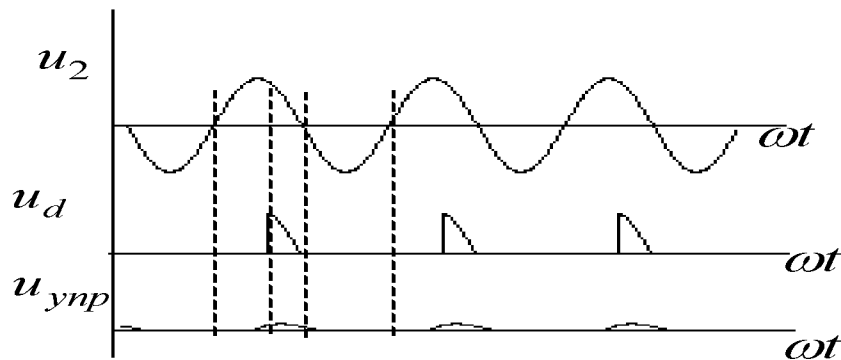
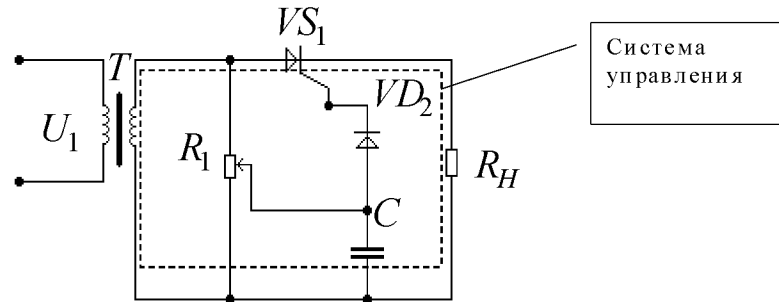
Поява в елементній базі такого елемента як ТИРИСТОР дало змогу додати випрямлячу ще одну істотну властивість – можливість не тільки випрямляти напругу але і регулювати величину напруги на його виході. Іншими словами з'явилася можливість управляти випрямленою напругою безпосередньо за допомогою схем випрямлення.

Схеми випрямлячів, основу яких складають тиристори, ідентичні діодним схемам. Однак, оскільки тиристор це керований вентиль, такі схеми повинні містити і систему керування тиристорами.

#### Однофазний однонапівперіодний тиристорний випрямляч.

Такий випрямляч являє собою пристрій, що має у своєму складі однофазний трансформатор, у коло вторинної обмотки якого включені послідовно - керований напівпровідниковий вентиль -- тиристор  $VS_1$ , і навантаження  $R_H$ .

Забезпечення керування роботою тиристора, у схемі Випрямляча здійснюється системою керування роботою тиристора, що далі будемо називати -- просто система керування (СК).



Основна особливість роботи тиристорних випрямлячів є в тому, що відкриття тиристора відбувається не в точці природної комутації, коли на його аноді з'являється позитивний потенціал, у момент подачі ПРИ ЦЬОМУ на керуючий електрод тиристора позитивного керуючого імпульсу напруги.

Імпульс керування тиристором подається з визначеною затримкою в часу стосовно моменту його природного включення, це здійснюється за рахунок зрушення фаз, між анодною напругою  $u_2$  і напругою  $u_{ynp}$ , що подається на керуючий електрод тиристора. Це зрушення фаз називають кутом керування тиристора.

КУТОМ КЕРУВАННЯ ТИРИСТРОМ називають зрушення фаз між анодною напругою і напругою, поданою на керуючий електрод тиристора. Кут керування відраховується в електричних градусах, від точки природного відкриття діода.

## 5.ПРИНЦИПИ РЕГУЛЮВАННЯ ДЛЯ ОДНОФАЗНИХ І ТРИФАЗНИХ ТИРИСТОРНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ.

Система керування тиристорами являє собою сукупність функціональних вузлів і елементів, що призначені для керування провідністю тиристорів силової частини перетворювача, і регулювання вихідних параметрів перетворювача.

Як було сказано вище, для відкриття тиристора необхідно подати на його керуючий електрод керуючий імпульс.

Струм керування може являти собою постійний струм або імпульси різної тривалості й амплітуди. Для керування тиристорами, частіше усього використовуються імпульсні сигнали.

В даний час найбільше поширення одержав фазоімпульсний метод керування тиристорами, що полягає в тому, що на керуючий електрод кожного тиристора періодично, із частотою живлячої анодної напруги, подаються електричні імпульси, завдяки чому в ці моменти часу відбувається відкриття тиристорів.

Змінюючи фазу імпульсів, щодо визначеної точки живлячої напруги мережі, можна змінювати кут вмикання тиристорів і тим самим регулювати струм на виході Випрямлячів.

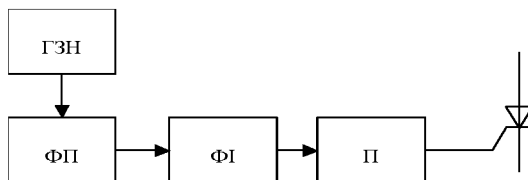
Функції системи керування тиристорами:

- створення синхронізованої з напругою живлячої мережі  $m$  – фазної системи імпульсів керування, кожний із яких здатний вмикнути будь-який тиристор, застосований у перетворювачі.
- розподіл імпульсів керування по тиристорах відповідно до обраної схеми керування.
- зрушення по фазі імпульсів керування щодо анодної напруги тиристорів, шляхом зміни моментів їхньої подачі на їхні керуючі електроди.

**Методи керування тиристорними перетворювачами**

**Горизонтальний метод керування.**

При горизонтальному методі керування формування керуючого імпульсу відбувається в момент переходу синусоїдальної напруги через нуль, а зміна його фази забезпечується зміною фази синусоїдальної напруги.

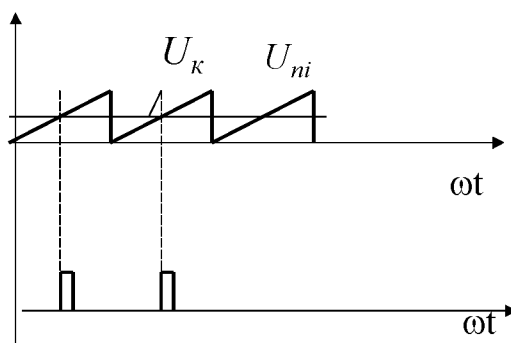


*Принцип роботи схеми.*

Змінна напруга з генератора змінної напруги (ГЗН) (як правило одна з фаз мережі) надходить на фазообертовий пристрій (ФП), потім зрушена по фазі напруга надходить на формувач імпульсів, де в момент переходу синусоїди через нуль формується керуючий імпульс, що потім підсилюється підсилювачем (П). Кут зрушення фаз регулюється зміною напруги ГЗН і ФП, що разом утворюють фазозрушуючий пристрій.

Вертикальний метод керування

При вертикальному методі керування формування керуючого імпульсу робиться в результаті порівняння на нелінійному елементі величин постійної напруги керування  $U_k$ , із величинами Змінного (синусоїдного), пилообразного або трикутного напруг. У момент, коли порівнювані напруги стають рівними і потім їхню різницю змінює знак, відбувається формування імпульсу. Фазу імпульсу можна змінювати змінюючи величину постійної напруги.

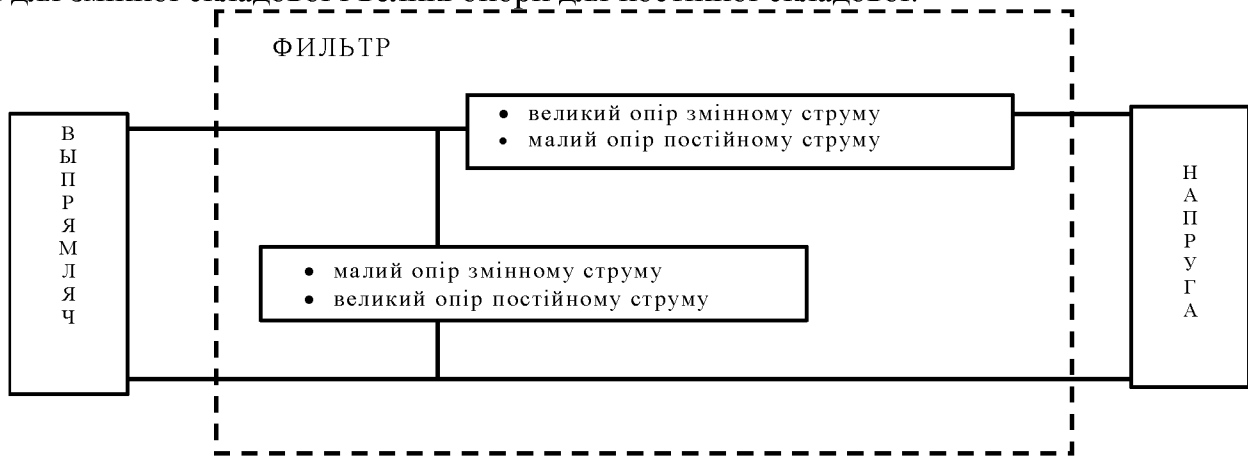


## 6. ЗГЛАДЖУЮЧІ ФІЛЬТРИ: АКТИВНІ І ПАСИВНІ.

Фільтр, що згладжує, являє собою пристрій, до складу якого входять реактивні елементи – індуктивності і конденсатори, з'єднані по схемах таким чином, щоб пропускати з малим ослабленням постійну складову випрямленої напруги і значно послабляти його змінну складову.

Фільтр включається між схемою випрямлення і навантаженням. Вибір елементів фільтра і їхнього електричного з'єднання робиться так, щоб послідовно включені з навантаженням елементи мали великі опори для змінної складової струму і малі опори для постійної складової і

навпаки, елементи фільтра що включаються паралельно навантаженню, повинні мати малі опори для змінної складової і великі опори для постійної складової.



Як елементи фільтра що вмикаються послідовно можуть бути застосовані дросель, резонансне коло, із рівнобіжних з'єднань конденсатора і дроселя, а для малопотужних споживачів резистор. У якості що паралельно включаються елементів використовується конденсатор або резонансне коло з конденсатора і дроселя з'єднаних послідовно.

Фільтри, що згладжують, застосовуються для згладжування пульсацій випрямленої напруги до рівня, що потрібно за умовами експлуатації. Оцінка дії згладжуючого фільтра, звичайно проводиться по величині його коефіцієнта згладжування. Коефіцієнтом згладжування фільтра прийнято вважати відношення коефіцієнта пульсацій на вході фільтра  $K_{\Pi'}$  до коефіцієнта пульсацій на його виході  $K_{\Pi}$  :

$$K_{CG} = \frac{K_{\Pi'}}{K_{\Pi}}$$

При виборі згладжуючого фільтра, крім коефіцієнта згладжування також враховуються умови, при яких працює фільтр, щоб не губився режим роботи споживача, а також істотно не погіршувався режим роботи випрямляча. Необхідно передбачати малий вихідний опір фільтра, що робиться так:

$$Z_{вих} = \frac{U_{m\text{ вих}}}{I_{m\text{ вих}}} r_{вих} + jX_{вих}.$$

Для того, щоб істотно не погіршувався режим роботи випрямляча як у сталих так і перехідних режимах, необхідно правильно вибирати схему фільтра і параметри його елементів. Так, наприклад, у потужних фільтрах не рекомендується використовувати фільтри з ємнісною ланкою, тому що вони погіршують форму струму у вентилях і обмотках трансформатора, що приводить до росту втрат у них і перевищенню встановленої потужності. І, навпаки, для випрямлячів малої потужності, енергетичні показники яких не потрібно підвищувати, ємнісні фільтри доцільно застосовувати.

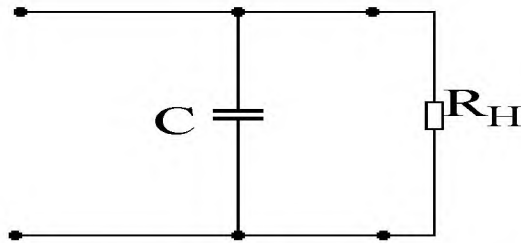
До фільтрів пред'являються також вимоги по їхньому конструктивному виконанню (маса, габарити, ККД і т.д.) і по експлуатаційних особливостях (вартість, надійність).

У залежності від елементного складу фільтри, поділяються на

- R, L, C-- фільтри;
- електронні фільтри
- фільтри в мікроелектронном виконанні.

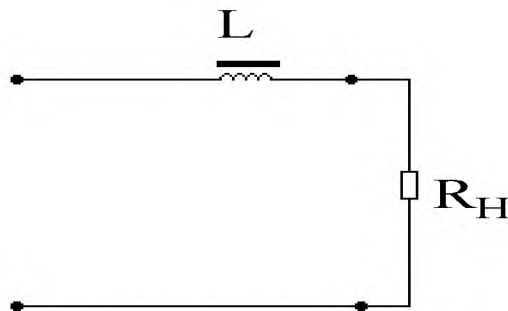
## ЄМНІСНИЙ ІНДУКТИВНІ ФІЛЬТРИ

### ЄМНІСНИЙ ФІЛЬТР.



Дія фільтра, що складається з ємності, засновано на запасі енергії в електричному полі конденсатора при відкритому вентилі, і його розряді під час відсутності струму навантаження, що тече через вентиль на опір  $R_H$ . Чим більше  $R_H$ , тим повільніше розряджається конденсатор і тим найбільш гладкою буде напруга на ньому. Тому ємнісні фільтри застосовують при малих струмах навантаження і великих опорах.

### ІНДУКТИВНИЙ ФІЛЬТР

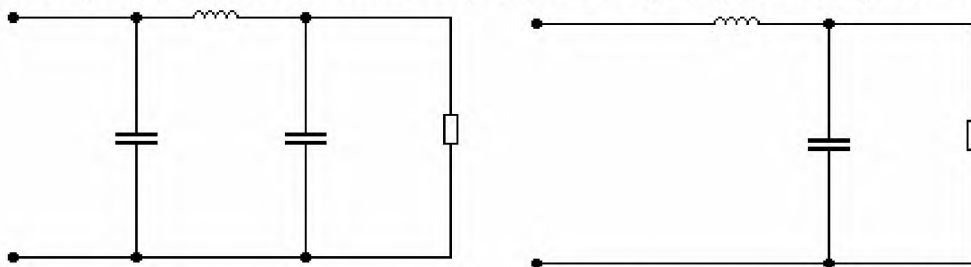


Індуктивний фільтр являє собою дросель, включений послідовно з навантаженням. Його згладжуюча дія, заснована на виникненні в дроселі ЕРС самоіндукції, що перешкоджає швидкому наростанню і спаду випрямленого струму. Зменшення пульсацій у навантаженні при включенні дроселя може бути обумовлене тим, що на дроселі при дотриманні нерівності

$X_L = m\omega L_{др} \gg R_H$  спостерігається падіння напруги пульсацій, тоді як падіння постійної складової напруги спостерігається головним чином у навантаженні  $R_H$ .

### ІНДУКТИВНО-ЕМКОСТНІ ФІЛЬТРИ й АКТИВНО-ЕМКОСТНІ ФІЛЬТРИ

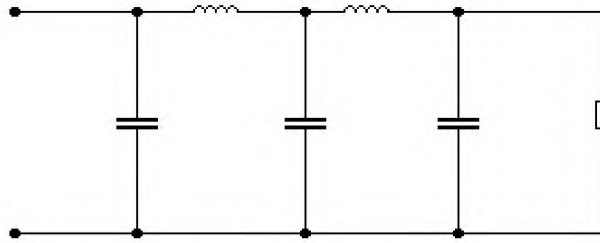
Найбільше поширеними з них мають Г-образні LC -- фільтри і П-образні LC -- фільтри.



В Г-образних фільтрах до Випрямляча безпосередньо підключається дросель, тому в цілому фільтр є для Випрямляча навантаженням індуктивного характеру. У зв'язку з цим Г-образні фільтри використовуються при середніх і великих випрямних струмах.

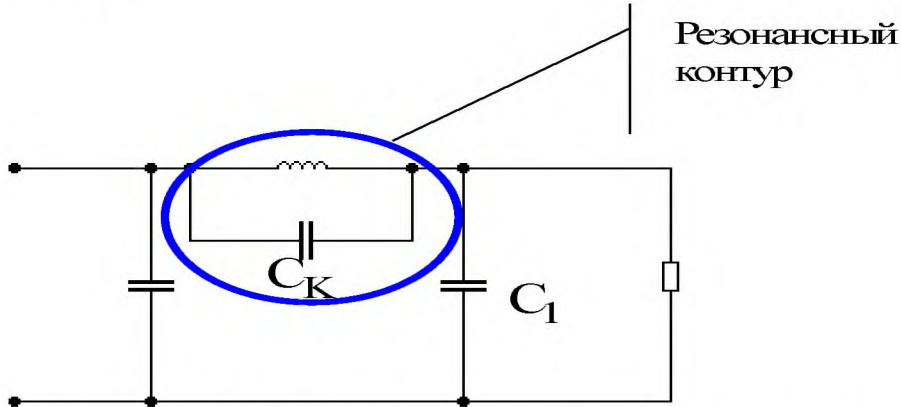
Г-образні LC фільтри доцільно застосовувати тоді, коли потрібно забезпечити коефіцієнт згладжування 20...24...24

У П-образних фільтрах паралельно виходу Випрямляча підключається ємність, тому в цілому для Випрямляча фільтр є навантаженням ємнісного характеру і застосовується для згладжування пульсацій при невеликих випрямлених струмах. Можна розглядати П-образний фільтр, як складовий із двох фільтрів ємнісного і Г-образного. З метою поліпшення якості фільтрації індуктивно-ємнісні фільтри можуть виконуватися багатоланковими.



У Випрямлячах малої потужності, при навантаженнях, що не вимагають високих коефіцієнтів сгладжування, знаходять застосування RC -- фільтри, що збираються по тим же схемам, що і LC -- фільтри, тільки замість дроселя включається активний опір. Заміна дроселя резистором дозволяє зменшити габарити, вагу і вартість фільтра.

### РЕЗОНАНСНІ ФІЛЬТРИ



Для поліпшення властивостей фільтра, що згладжують, іноді застосовуються явище послідовно і рівнобіжного резонансів.

Величину  $C_K$  вибирають таким способом, щоб коливальний контур  $LC$  виявився настроєним на першу гармоніку пульсацій. Тоді для першої гармоніки еквівалентний опір контуру, що дорівнює

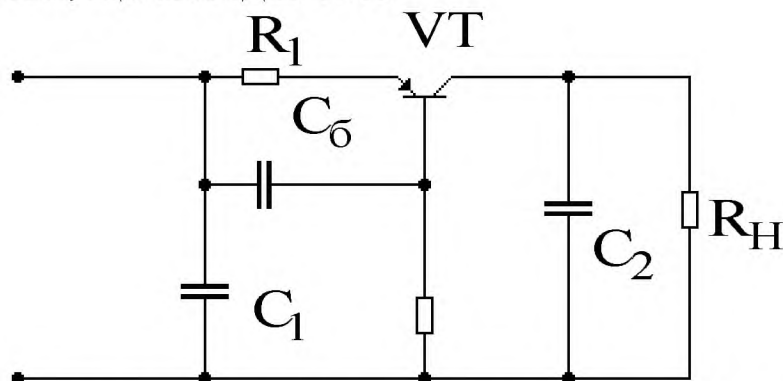
$$R_{\text{Э}} = \frac{I_{\phi}}{R_L C_K}$$

буде дуже великим і змінна складова випрямленої напруги майже цілком виділиться в контурі, коефіцієнт сгладжування такого фільтра може бути приблизно обчислений по формулі

$$K_{CF} = \frac{m\omega L C_1}{R_L C_K};$$

Практична величина коефіцієнта сгладжування збільшується в 3 -- 4 рази в порівнянні з П-подібним фільтром.

### ЕЛЕКТРОННІ ФІЛЬТРИ, ЩО ЗГЛАДЖУЮТЬ



$RLC$  — фільтри прості і надійні в експлуатації, однак їхня маса і габарити істотно впливають на загальну масу і габарити випрямляючого пристрою і живлячої апаратури. Це пояс-

нюється тим, що габарити дроселя фільтра з ростом струму навантаження різко зростають. При цьому в результаті насичення сердечника дроселя, постійною складовою випрямленого струму індуктивність його зменшуються і властивості фільтра, що фільтрують, погіршуються. Шкідливий вплив на апаратуру роблять магнітні поля дроселя.

Напівпровідникові фільтри не містять згладжуючих дроселів, тому не мають перерахованих недоліків.

Транзисторні фільтри застосовуються при струмах навантаження до декількох ампер і напругах обумовлених десятками вольт.

Колекторна характеристика транзистора подібна кривій намагнічування феромагнітного сердечника дроселя, тому транзистор може виконувати роль дроселя фільтра. Опір переходу емітер-колектор Змінного Струму значно більше чим постійному, тому на транзисторі буде спостерігатися падіння Змінної складової, а постійна складова піде на навантаження ( що і було потрібно). Для підтримки обраного режиму роботи транзистора служать елементи  $C_6, R_1$ . Ємність конденсатора  $C_6$  вибирається так, щоб період його розряду був значно більше періоду пульсацій. У цьому випадку напруга на конденсаторі не встигає істотно змінитися через пульсації і струм емітера залишається постійним. Конденсатори  $C_1, C_2$  виконують роль фільтрів, як і в схемі П -- образного фільтра.

### **Завдання на самостійну роботу:**

#### **Повторити**

1. Вторинне джерело електроживлення
2. Класифікація схем випрямлення
3. Роботу однофазних та трифазних схем випрямлення
4. Роботу тиристорної схеми випрямлення
5. Принципи регулювання тиристорами
6. Основи побудови фільтрів

## Лекція № 18 (2 год.)

### Тема 6. Перетворювачі струму для електричного автотранспорту та систем накопичення електроенергії

#### 1. ОСНОВИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ У ЗМІННИЙ. КЛАСИФІКАЦІЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ІНВЕРТОРІВ

Перетворювачі постійного струму в змінний використовуються для одержання змінного струму в системах, де основними джерелами електроенергії є джерела постійного струму: хімічні джерела, сонячні батареї та інші безпосередні перетворювачі первинної енергії в електричну енергію постійного струму.

Процес перетворення постійного струму в змінний, зветься **інвертування струму**. Термін «інвертування» відбувається від латинського слова *inversio* - перевертання, перестановка і позначає процес, зворотний випрямленню.

**Фізична сутність інвертування** постійного струму полягає в тому, що за допомогою застосування напівпровідникових приладів, що працюють у ключовому режимі, з'єднаних у схему інвертора, і відповідного чергування замкнутого і розімкнутого їхніх станів забезпечується таке підключення навантаження до джерела постійного струму, при якому напрямок струму в навантаженні подібний протіканню по ньому змінного струму.

У якості ключів інверторів систем електропостачання використовуються керовані напівпровідникові прилади, здатні працювати в ключовому режимі: транзистори і тиристори.

Інвертори можуть класифікуватися по наступних основних ознаках:

- по типу елементної бази силового кола - транзисторну і тиристорні;
- по способу керування - із самозбудженням (автогенератори, автономні інвертори) і незалежним (зовнішнім) збудженням (підсилювачі потужності, ввідні інвертори);
- по схемній побудові - однофазні і багатofазні, одноконтурні і двоконтурні (із відводом від середньої точки первинної обмотки трансформатора), мостові, напівмостові;
- по характеру процесів у силовому колі - інвертори напруги (напруга на вході інвертора незмінна), інвертори струму (струм на вході інвертора незмінний) і резонансні інвертори.

#### Принцип дії різних схем інвертування

##### *Однофазна нульова схема інвертування*

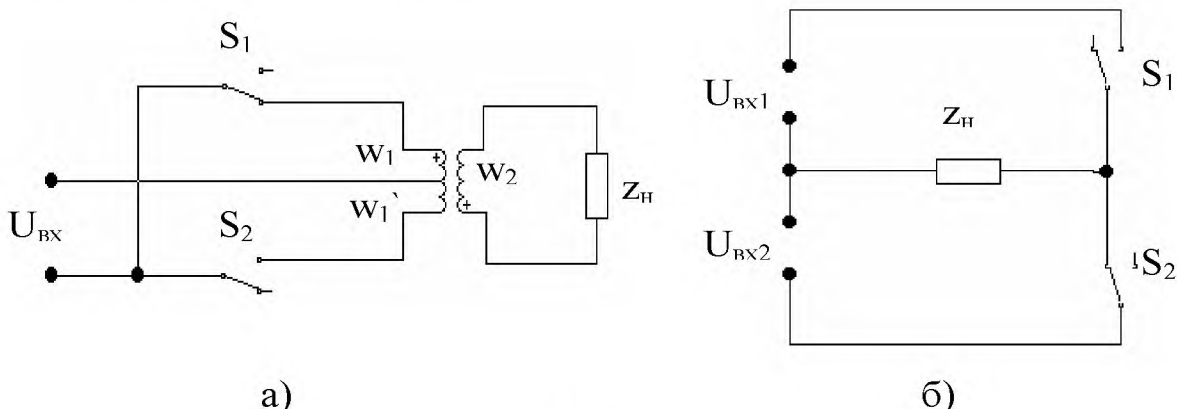


Рис. 1

Розрізняють трансформаторну (рис. 1а) і безтрансформаторну (рис. 1б) однофазні нульові схеми інвертування. При почерговому замиканні перемикачів  $S_1$ ,  $S_2$  через опір навантаження  $Z_H$  будуть текти імпульси струму прямокутної форми різної полярності.

##### *Однофазна мостова схема інвертування*

Розрізняють трансформаторну (рис. 2а) і безтрансформаторну (рис. 2б) однофазні мостові схеми інвертування.

При почерговому замиканні перемикачів  $S_1 - S_4$ ,  $S_2 - S_3$  через опір навантаження  $z_H$  будуть текти імпульси струму прямокутної форми різної полярності.  
На відміну від нульової схеми, у трансформаторі не потрібно нульової точки, а в джерелі живлення – біполярного джерела.

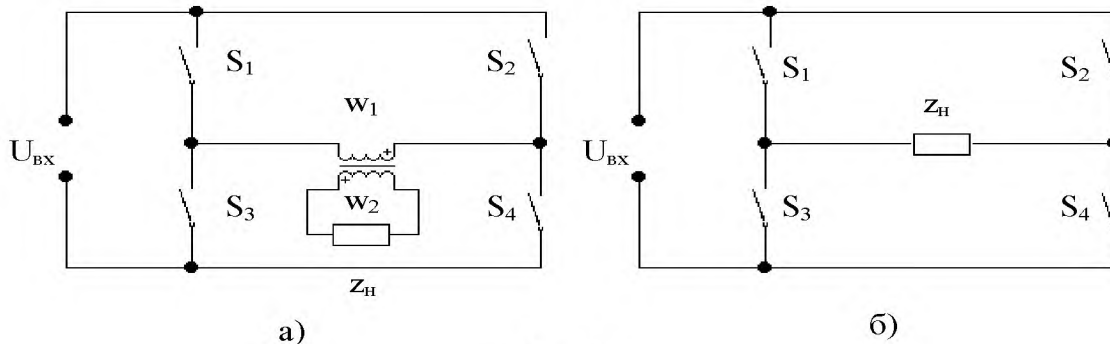


Рис. 2

### Трифазна схема інвертування

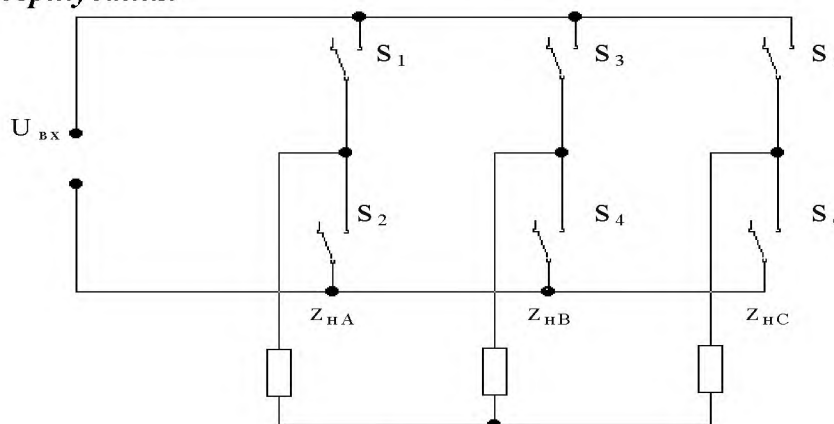


Рис. 3

При роботі схеми (рис. 3) по черзі, через заданий інтервал часу, що відповідає зрушенню по фазі в 120 градусів, замикаються перемикачі  $S_1 - S_4$ ,  $S_2 - S_5$ ,  $S_3 - S_6$ . При цьому, у навантаженні течуть відповідні імпульси струму різної полярності.

Таким чином, для реалізації схем інверторів необхідно мати:

- комплект напівпровідникових приладів, що працюють у ключовому режимі, з'єднаних по визначених схемах;
- система керування, що забезпечує порядок переключення напівпровідникових приладів так, щоб по навантаженню тік змінний струм.

## 2. СТРУКТУРНІ СХЕМИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ІНВЕРТОРІВ

У залежності від призначення і схемного рішення до складу напівпровідникового інвертора крім одного або декількох напівпровідникових приладів можуть входити трансформатори, фільтри, допоміжні й інші пристрої.

Узагальнена структурна схема напівпровідникового інвертора приведена на рис. 4.

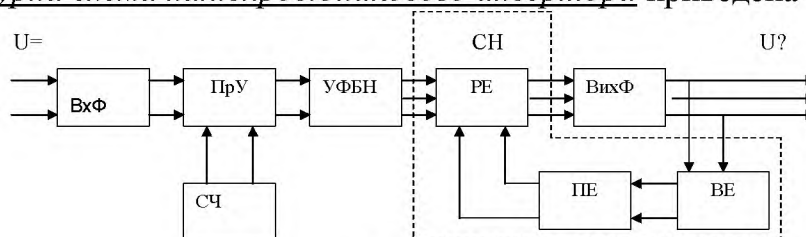


Рис. 4

Основою інверторів є схеми інвертування постійного струму, виконані на транзисторах або тиристорах, і системи керування роботою цих комутуючих елементів.

На вході інвертора з боку джерела постійного струму з напругою  $U =$  включений вхідний фільтр  $Vx$ , що призначений для фільтрації струму або напруги джерела електроживлення.

Якщо споживач електроенергії багатозафазний, то в структуру інвертора включається пристрій формування багатозафазної напруги  $УФБН$ , наприклад, трифазного.

У кожен фазу вихідної напруги установлений вихідний фільтр  $VихФ$  для фільтрації вихідної напруги.

Забезпечення регулювання або стабілізації вихідної змінної напруги здійснюється регулятором напруги  $РН$ , що складається з вимірювального елемента  $ВЕ$ , підсилюючого елемента  $ПЕ$  і регулюючого елемента  $РЕ$ .

Для стабілізації частоти напруги або струму що інвертуються використовується стабілізатор частоти  $СЧ$ , що представляє собою пристрій із дуже стабільною вихідною частотою.

Структурна схема нестабілізованого однофазного автономного інвертора приведена на рис. 5а.

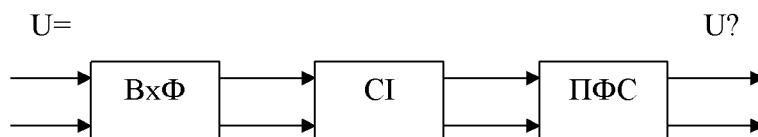


Рис. 5а

На вході такого інвертора установлюється вхідний фільтр  $VxФ$ , напруга з якого подається на схему інвертування  $СІ$  із самозбудженням. Інвертована напруга подається на пристрій формування синусоїди  $ПФС$ , із виходу якого отримується змінна синусоїдна напруга.

Структурна схема стабілізованого однофазного введеного інвертора приведена на рис. 5б.

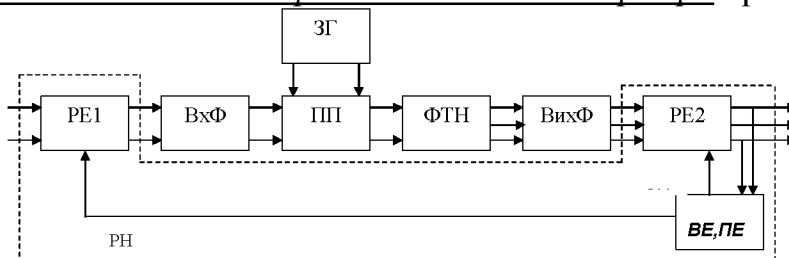


Рис. 5б

До складу розглянутого транзисторного інвертора входять:

- кварцовий генератор,  $ЗГ$ ;
- транзисторний підсилювач потужності  $ПП$ , що забезпечує посилення сигналів генератора,  $ЗГ$
- формувач трифазної системи вихідної напруги  $ФТН$
- вхідний  $Vx$  і вихідний  $Vих$  фільтри, для поліпшення форми вихідного сигналу;
- регулятор напруги  $РН$ , до складу якого входять вимірювальний елемент  $ВЕ$ , підсилювальний елемент  $ПЕ$ , регулюючий елемент постійного струму  $РЕ1$  і змінного струму  $РЕ2$ .

Такі інвертори забезпечують велику потужність, сталість частоти, вихідної напруги і форми синусоїди при зміні навантаження перетворювача.

### 3.ТРАНЗИСТОРНІ АВТОНОМНІ ІНВЕРТОРИ

Розглянемо схему двотактного однофазного транзисторного інвертора: автогенератор із самозбудженням (автогенератор Ройера).

Схема (рис. 6) містить у якості основних елементів:

- транзистори  $VT1, VT2$ , що працюють у ключовому режимі;
- трансформатор  $T1$ , магнітопровід якого має прямокутну петлю гістерезису.

Відомо, що швидкість зміни магнітного потоку  $\Phi$  в сердечнику трансформатора прямо пропорційна величині прикладеної до обмотки напруги  $U$  і навпаки, величина наведеної в обмотці напруги  $U$  пропорційна швидкості зміни магнітного потоку  $\Phi$ :

$$U = w \frac{d\Phi}{dt}.$$

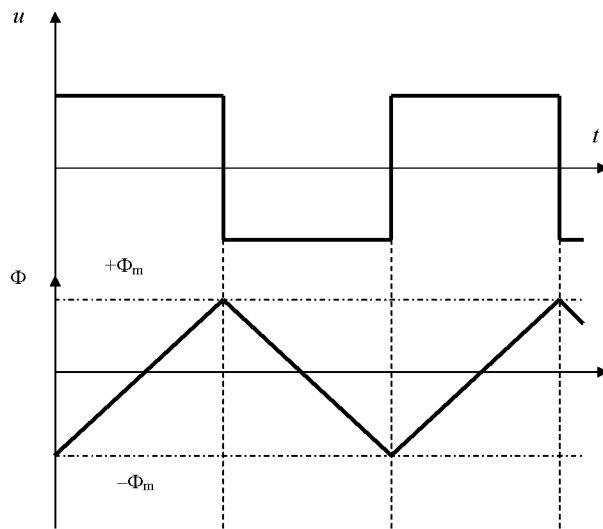
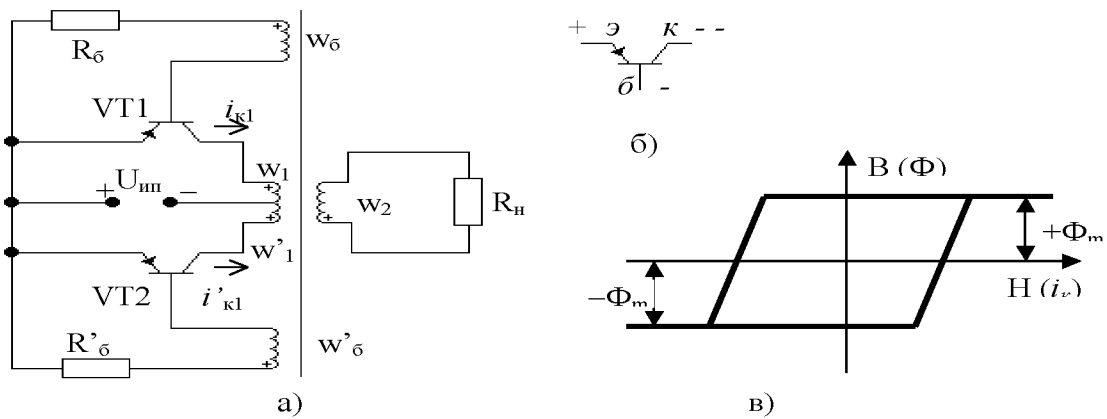


Рис. 6

Тому почергове підключення джерела постійної напруги  $U_{дж}$  до первинних напівобмоток трансформатора  $w_1$  і  $w'_1$  викликає лінійну зміну магнітного потоку  $\Phi$ .

Розглянемо роботу такого перетворювача (рис 7).

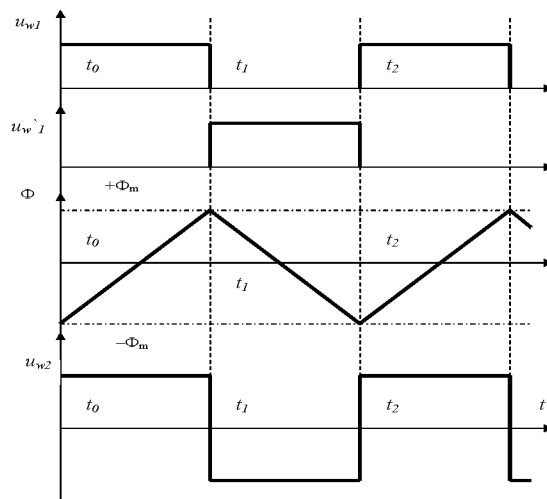


Рис. 7

Це, у свою чергу, викликає виникнення постійної напруги  $U_2$  різної полярності на вторинній обмотці трансформатора  $T1$ . Отже, для правильної роботи схеми інвертування необхідно забезпечити почергове вмикання транзисторів  $VT1$  і  $VT2$ . Для цього транзистори  $VT1$  й  $VT2$  охоплені позитивним зворотним зв'язком за допомогою обмоток  $w_{\delta}$  і  $w'_{\delta}$ . Цей зворотній зв'язок при збільшенні магнітного потоку, забезпечує відкриття одного транзистора і закриття іншого, і навпаки.

1. **Інтервал  $t = t_0$ .** У початковий момент часу ( $t = t_0$ ) транзистори  $VT1$  і  $VT2$  знаходяться в однакових умовах, але через неідентичності їхніх характеристик струми  $i_{K1}$ ,  $i_{K2}$ , що течуть через напівобмотки  $w_1$  і  $w'_1$ , будуть різними. У сердечнику трансформатора  $T1$  потече результируючий магнітний потік  $\Phi$ , що викличе повне відкриття одного транзистора (наприклад,  $VT1$ ) і повне закриття іншого транзистора (наприклад,  $VT2$ ).
2. **Інтервал  $t_0 \div t_1$ .** Як тільки  $VT1$  відчиниться, напруга  $U_{дж}$  виявиться прикладеною до напівобмотки  $w_1$ . Це викличе лінійне зростання магнітного потоку від  $-\Phi_m$  до  $+\Phi_m$  (див. рис. 6 в, г). При цьому, виникає позитивна напруга  $U_2$  у вторинній обмотці  $w_2$ , негативний зсув на базі транзистора  $VT1$  (що приводить до його повного відкриття) і позитивний зсув на базі транзистора  $VT2$  (що приводить до його повного закриття).
3. **Інтервал  $t = t_1$ .** Як тільки величина магнітного потоку  $\Phi$  стане рівної  $+\Phi_m$ , відбудеться насичення сердечника, і швидкість зміни магнітного потоку стане рівної 0. Величина ЕРС в обмотках зворотного зв'язку  $w_{\delta}$  і  $w'_{\delta}$  також стане рівної нулю. Негативний зсув на базі транзистора  $VT1$  починає зменшуватися. Транзистор  $VT1$  починає закриватися. Магнітний потік  $\Phi$  у сердечнику починає зменшуватися. ЕРС в обмотках зворотнього зв'язку  $w_{\delta}$  і  $w'_{\delta}$  змінюють свій знак. Внаслідок дії зворотнього зв'язку транзистор  $VT1$  різко закривається, а  $VT2$  різко відкривається.
4. **Інтервал  $t_1 \div t_2$ .** Як тільки  $VT2$  відчиниться, напруга  $U_{дж}$  виявиться прикладеною до напівобмотки  $w'_1$ . Це викличе лінійне убування магнітного потоку від  $+\Phi_m$  до  $-\Phi_m$  (див. рис. 6 в, г). При цьому, виникає негативна напруга  $U_2$  у вторинній обмотці  $w_2$ , негативний зсув на базі транзистора  $VT2$  (що приводить до його повного відкриття) і позитивний зсув на базі транзистора  $VT1$  (що приводить до його повного закриття).
5. **Інтервал  $t = t_2$ .** Як тільки величина магнітного потоку  $\Phi$  стане рівної  $-\Phi_m$ , відбудеться насичення сердечника, і швидкість зміни магнітного потоку стане рівної 0. Розмір ЕРС в обмотках зворотного зв'язку  $w_{\delta}$  і  $w'_{\delta}$  також стане рівної нулю. Негативний зсув на базі транзистора  $VT2$  починає зменшуватися. Транзистор  $VT2$  починає закриватися. Магнітний потік  $\Phi$  у сердечнику починає зменшуватися. ЕРС в обмотках зворотного зв'язку  $w_{\delta}$  і  $w'_{\delta}$  змінює свій знак. Внаслідок дії зворотного зв'язку транзистор  $VT2$  різко закривається, а  $VT1$  різко відкривається.

*Таким чином, за допомогою транзисторів  $VT1$ ,  $VT2$  здійснюється почергове підключення джерела постійної напруги до первинних напівобмоток трансформатора  $w_1$  і  $w'_1$ , що викликає почергову зміну магнітного потоку сердечника трансформатора  $T1$  від  $-\Phi_m$  до  $+\Phi_m$ . При цьому, у вторинній обмотці  $w_2$  виникає вихідна змінна напруга синусоїдальної форми.*

#### Параметри інвертора

- вихідна напруга:  $U_2 = \frac{w_2}{w_1} U_1$ ;

– частота:  $f = \frac{U_1 \cdot 10^4}{4B_m \cdot S \cdot w_1}$ , [Гц],

де

$U_1 = U_{un} - U_{ЭК}$  - напруга на первинній напівобмотці  $w_1$  трансформатора  $T1$ , В;

$U_{дж}$  - напруга джерела харчування;

$U_{ЭК}$  - напруга переходу колектор - еміттер транзистора  $VT1$  або  $VT2$ ;

$w_1$  - число витків первинної напівобмотки трансформатора  $T1$ ;

$B_m$  - максимальна індукція в сердечнику, Тл;

$S$  - переріз магнітопровода трансформатора, см<sup>2</sup>.

#### Достоїнства:

– простота, легкість у виготовленні і налазці.

#### Недоліки:

– неефективність на високих частотах ( $> 1-3$  кГц);

– напруга на закритому транзисторі  $U_{ЭК}$  дорівнює подвоєній напрузі джерела живлення  $U_{un}$ ;

– у момент відключення транзистора вихідна напруга  $U_2$  має викид, обумовлений впливом ЕРС самоіндукції (тому максимальна вихідна напруга обмежена 25-30 В);

– частота вихідної напруги  $f$  залежить від напруги джерела харчування  $U_{un}$  і параметрів транзистора.

#### Область використання.

Автогенератори використовуються, як правило, у якості малопотужних генераторів задавання частоти, у неавтономних інверторах і схемах керування тиристорними випрямлячами.

## 4.ТРАНЗИСТОРНІ ВЕДЕНІ ІНВЕРТОРИ

Перетворення постійної напруги в змінну можна здійснити не тільки з застосуванням автогенераторів, у яких переключення транзисторів відбувається за рахунок самозбудження, але і з застосуванням транзисторних приладів, у яких переключення транзисторних ключів робиться примусово за рахунок використання незалежного збудження транзисторів схеми.

У якості приладів незалежного збудження використовуються транзисторні генератори задавання частоти прямокутної напруги, а в якості приладів, що безпосередньо здійснюють перетворення постійної напруги живлення в змінну напругу на навантаженні, - транзисторні підсилювачі потужності. Такі перетворювачі постійної напруги одержали назву **ведених інверторів**. Ці інвертори призначені для перетворення значних потужностей постійного струму і дозволяють забезпечити сталість частоти напруги на виході, а також незмінність форми кривої змінної напруги при зміні навантаження інвертора.

Схема веденого інвертора з підсилювачем потужності на транзисторах  $VT1$  і  $VT2$  і генератором, ЗГ подана на рис. 8.

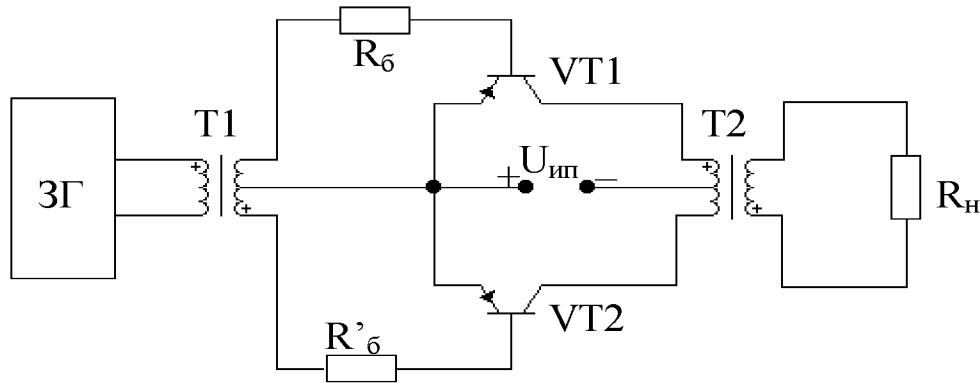


Рис.8

Робота схеми відрізняється від роботи схеми Ройера тим, що напруга на обмотках зворотного зв'язку  $w_{\delta}$  і  $w'_{\delta}$  змінюється відповідно до вихідної напруги генератора, що задає, ЗГ.

Для перетворення великих потужностей при більш високій напрузі джерела живлення застосовуються ведені транзисторні інвертори, зібрані по мостовій схемі.

## 5. МЕТОДИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПРЯМОКУТНОЇ НАПРУГИ В СИНУСОЇДНУ. РЕЗОНАНСНІ ФІЛЬТРИ

Формування синусоїдної напруги на виході інверторів здійснюється двома основними способами:

1. Установка на виході інвертора фільтра, що виділяє з напруги прямокутної форми основну гармоніку напруги.
2. Попереднє одержання багатофазної системи ЕРС і формування з неї потім вихідної напруги східчастої форми.

При першому способі використовуються спеціальні фільтри - **фільтри вищих гармонік**, тобто частотно-виборчі кола, складені з індуктивностей і ємностей і виконані таким чином, щоб при максимально можливому коефіцієнті передачі напруги в коло навантаження по першій гармоніці коефіцієнти передачі напруг вищих гармонік були мінімальними.

Типи фільтрів:

- Г-подібний  $LC$ -фільтр;
- П-подібний  $LC$ -фільтр;
- складний Г-подібний фільтр, що містить:
  - фільтри-пробки у виді рівнобіжних  $LC$  контурів, включених у коло лінійного струму;
  - фільтри-шунти у виді послідовних  $LC$  контурів, включених паралельно навантаженню.

Контури фільтра настроюються в резонанс на частоти найближчих кратних гармонік.

Другий спосіб дозволяє одержати синусоїдальну напругу без застосування фільтрів. Так, використання 24-фазної системи прямокутних напруг дозволяє одержати трифазну напругу з утриманням що найнижчи (23) гармоніки менше 4,5%.

Завдання на самостійну роботу:

Повторити:

1. Призначення інверторів
2. Принцип інвертування
3. Автогенератор Ройера
4. Структурні схеми інверторів
5. Методи перетворення прямокутної напруги на синусоїдну

**Лекція № 19 (2 год.)**  
**Тема 7. Сонячні зарядні електростанції для інфраструктури**  
**автомобільного електротранспорту**

**СОНЯЧНА ЕНЕРГІЯ ТА ОСНОВНІ СПОСОБИ ЇЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ**  
**В ЕЛЕКТРИЧНУ**

**1. Методи перетворення сонячної енергії в електричну**

Сонячна електростанція – інженерна споруда, служить перетворенню сонячної радіації у електричну енергію. Способи перетворення сонячної радіації різняться залежить від конструкції електростанції [1].

Одержання електроенергії від сонця давно застосовують у весь світ. Головне завдання науковців цей час необхідно так вдосконалити наявні технології, щоб якнайбільше збільшити їх ККД.

Останнім часом на дорогах України з'являється все більше електромобілів та plug-in гібридів, основне джерело енергії для яких є електрична енергія. У зв'язку з цим постає питання, як можна забезпечити електричною енергією ці транспортні засоби, причому без шкоди навколишньому середовищу? Одна з можливих відповідей на це питання – це сонячна зарядна електростанція для електромобілів та plug-in гібридів [2-4].

Сонячне випромінювання – екологічно чисте, що не виробляє шкідливих відходів, поновлюване джерело енергії. Запаси енергії сонячного випромінювання величезні: щорічно на Землю надходить  $1,05 \times 10^{18}$  кВт·год сонячної енергії, з яких  $2,0 \times 10^{17}$  кВт·год припадає на поверхню суші. Для перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію використовують різного виду та типу сонячні електростанції (СЕС). Одну з таких представлено на рисунку 1.1 [5].



Рисунок 1.1 – Сонячна електростанція

Незважаючи на величезну кількість надходить на поверхню Землі сонячної енергії, її використання для великомасштабного отримання електроенергії пов'язане з труднощами. Причому, слід зазначити, що різним типам СЕС притаманні різні труднощі, що впливають на вироблення електроенергії та, зазвичай, пов'язані з природними факторами, як низька щільність сонячної радіації на поверхні землі, переривчастий характер її надходження тощо. Перш, ніж перейти до характеристики різних типів СЕС, розглянемо методи перетворення сонячної енергії в електричну і теплову, що використовуються на цих станціях.

В даний час розроблено і освоєно в промислових масштабах ряд принципів перетворення сонячної енергії в електричну і теплову, які умовно можна розділити на прямі (безмашинних, так як в них енергія сонця безпосередньо перетворюється в електричну без проміжного стадії перетворення її в теплову енергію) і непрямі ( машинні – в них має місце проміжна стадія перетворення теплової енергії в механічну роботу).

Розглянемо ці методи перетворення сонячної енергії більш докладно [6].

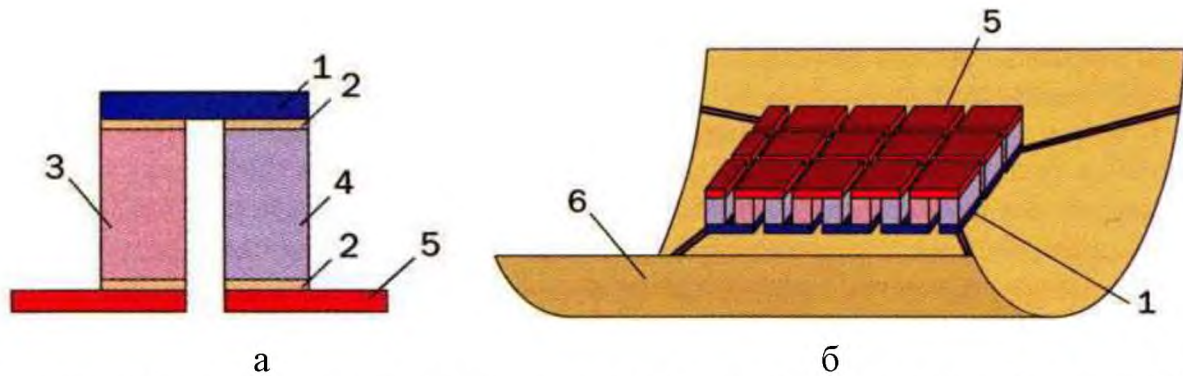
## **2. Пряме перетворення сонячної енергії в електричну**

Пряме перетворення сонячної енергії в електричну на сонячних електростанціях, що працюють на основі прямого перетворення сонячної енергії в електричну, застосовуються термоелектричні, термоемісійні і фотоелектричні (у вигляді сонячних батарей) перетворювачі – без проміжної стадії перетворення сонячної радіації в теплову енергію і механічну роботу. Коротко охарактеризуємо особливості схем цих перетворювачів і сутність їх роботи.

Термоелектричне перетворення сонячної енергії в електричну. Термоелектричний метод перетворення сонячної енергії заснований на ефекті, що складається у виникненні термо-ЕРС на кінцях двох різнорідних провідників, що знаходяться при різній температурі, відкритому в 1821 р. німецьким фізиком Т.І. Зеєбеком.

Спочатку цей ефект використовувався в термометрії для вимірювання температур за допомогою пристроїв-термопар, що мають енергетичний ККД, який визначається відношенням електричної потужності на навантаженні до підведеного тепла, яке не перевищує частки відсотка. Тільки після того, як академік А.Ф. Іоффе на початку 1940-х рр. запропонував використовувати для виготовлення термоелементів напівпровідники замість металів, вдалося істотно підвищити ККД і стало можливим використання термоелектричного ефекту в енергетиці.

Схема термоелектричного перетворювача енергії показана на рисунку 1.2.



а – окремий термоелемент перетворювача; б – термоелектричний модуль; 1 – гарячі спаї; 2 – антидифузійний шар; 3, 4 – позитивні і негативні кола, за якими відбувається перетік тепла в перетворювачі; 5 – холодні спаї; 6 – концентратор сонячного випромінювання

Рисунок 1.2 – Схема термоелектричного перетворювача енергії

Поєднуючи між собою окремі термоелементи, як це показано на рисунку 1.2,б можна створювати досить потужні термобатареї, кожна з яких розміщується в фокальній площині концентратора 6. При цьому гарячі спаї 1 батареї безпосередньо обігріваються сонячною концентрованою радіацією, а відведення тепла від холодних спаїв здійснюється випромінюванням.

Термоемісійне перетворення енергії. Термоемісійний метод перетворення енергії заснований на відкритому в 1883 р. Т. Едісоном явище термоелектронної емісії, яке полягає в випуску електронів з поверхні речовини при його нагріві. Принципова схема термоемісійного перетворювача показана на рисунку 1.3.

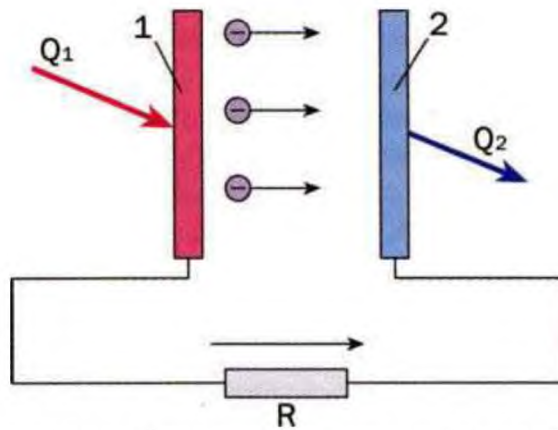
У разі забезпечення безперервного підведення тепла до емітера і відповідного охолодження колектору, який отримує тепло від електронів, що його досягають, у зовнішньому колі буде підтримуватися електричний струм, і таким чином буде відбуватися робота.

Термоемісійний перетворювач сонячної енергії є генератор електроенергії,  
в

Фотоелектричне перетворення сонячної енергії. Фотоелектричний метод перетворення сонячної енергії заснований в 1839 р Е. Беккерелем, а потім в 1873 р У.Смітом на явищі фотоелектричного ефекту та полягає в випуску електронів речовиною під дією світла. Незважаючи на недосконалість цих перших дослідів зі спостереження явища фотоелектричного ефекту, вони, тим не менш, ознаменували собою початок історії полупровідникових сонячних елементів: на початку 1920-х рр. в лабораторії Белла в процесі пошуку нових джерел енергії був винайдений кремнієвий сонячний елемент, який став попередником сонячних перетворювачів.

а  
г  
р  
і  
в

е  
м  
і  
т



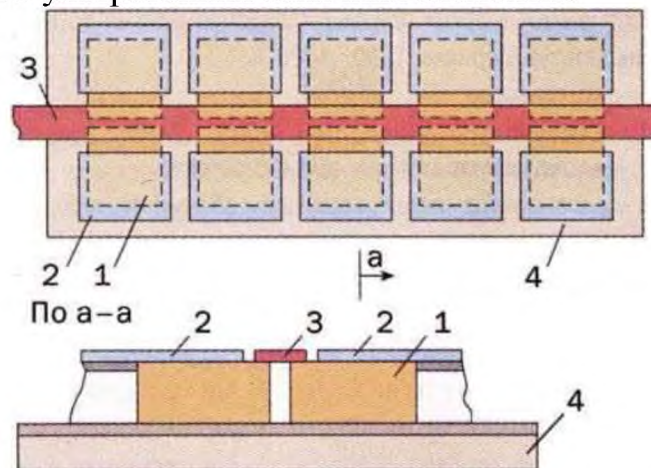
1 – катод (емітер), до якого підводиться тепла енергія; 2 – охолоджуваний анод (колектор);  $Q_1$ ,  $Q_2$  – тепло, що підводиться до катода;  $Q_2$  – тепло, що відводиться від анода;  $R$  – зовнішнє навантаження

Рисунок 1.3 – Схема принципова термоемісійного перетворювача

Відзначимо, що для цілей перетворення енергії сонячного випромінювання в електрику практично може бути застосований лише фотоефект замикаючого шару (фотоефект на  $p-n$  переході), який являє собою деяку область між двома частинами речовини з різним типом провідності.

Схема сонячної батареї, заснованої на явищі фотоефекту, який проявляється на  $p-n$ -переході в напівпровіднику при висвітленні його потоком світла, показана на рисунку 1.4.

В цій батареї  $p-n$  (або  $n-p$ ) перехід створюють введенням в монокристалічний напівпровідниковий матеріал-базу домішки з протилежним знаком провідності (наприклад, в кремній вводять алюміній або літій). В результаті при попаданні на  $p-n$ -перехід сонячного випромінювання відбувається збудження електронів валентної зони, і у зовнішньому колі утворюється електричний струм. ККД сучасних сонячних батарей досягає 13 ... 22 %, причому він найбільш високий в разі використання на СЕС ультратонких сонячних елементів.



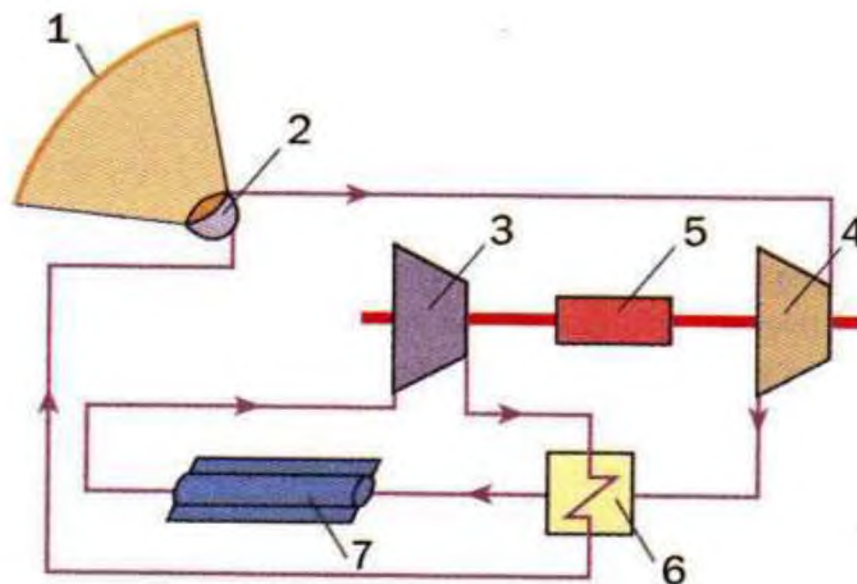
1 – сонячний елемент; 2 – захисне скло; 3 – комутаційна шина; 4 – підкладка

Рисунок 1.4 – Схема сонячної батареї, заснованої на явищі фотоефекту, який проявляється на  $p-n$ -переході напівпровіднику

### 3. Непряме перетворення сонячної енергії в електричну

Найбільш відомими непрямыми перетворювачами енергії є паро- і газотурбінні установки, що працюють на ТЕС і АЕС. Принципово вони можуть працювати і в умовах космосу зі спеціальним теплообмінником-випромінювачем, який виконує роль конденсатора пара, але оскільки, на відміну від наземної паротурбінної установки, де теплота конденсації відводиться потоком води в умовах космосу відведення тепла від відпрацьованого пара в паровій турбіні або газу в газовій турбіні можлива тільки випромінюванням, то енергоустановки повинна бути замкнутою.

Принципова схема замкнутої газотурбінної установки (ЗДТУ) показана на рисунку 1.5.



1 – концентратор сонячної енергії; 2 – сонячний котел, в якому зібрана концентратором сонячна енергія нагріває робоче тіло-інертний газ до температур близько 1200 ... 1500 К; 3 – компресор; 4 – газова турбіна; 5 – електрогенератор змінного струму; 6 – регенератор, який підігріває робочий газ після компресора; 7 – холодильник-випромінювач

Рисунок 1.5 – Схема принципова замкнутої газотурбінної установки

Випробування дослідної трьохкіловаттної газотурбінної установки такого типу показали, що її ККД дорівнює 11%.

### 4. Основні типи сонячних електростанцій

В даний час побудовані і успішно працюють в багатьох країнах світу такі два види СКС, що перетворюють енергію сонячної радіації в електроенергію згідно розглянутим вище принципам [7]:

– фотоелектричні – безпосередньо перетворюють сонячну енергію в електричну за допомогою сонячних фотоелементів.

– термодинамічні – перетворюють сонячну енергію в теплову, а потім в електричну.

#### *Фотоелектричні сонячні електростанції.*

Головними елементами таких станцій є сонячні батареї, що складаються з тонких плівок кремнію або других напівпровідникових матеріалів, які перетворюють сонячну енергію в постійний електричний струм. Їх відмінні риси: надійність, стабільність, здатність перетворювати як прямий, так і розсіяне сонячне світло, невелика маса, простота обслуговування, модульний тип конструкції, що дозволяє створювати установки будь-якої потужності. Основний недолік – висока вартість і низький ККД.

#### *Термодинамічні сонячні електростанції.*

Основу таких станцій складають теплообмінні елементи з селективним світлопоглинальним покриттям, що здатно поглинати до 97 % сонячного світла, що потрапляє на них, причому ці елементи навіть за рахунок звичайного сонячного освітлення можуть нагріватися до 200 °С і більше. За цей рахунок вода перетворюється в пар в звичайних парових котлах, що дозволяє отримати в паровій турбіні ефективний термодинамічний цикл. ККД сонячної паротурбінної установки може досягати 20 %.

Відзначимо, що на основі термодинамічного ефекту була розроблена конструкція сонячної аеростатної електростанції (САЕС), у якій в якості джерела енергії використовується заповнений водяною парою балон аеростата. Зовнішня частина цього балона пропускає сонячні промені, а внутрішня покрита селективним світлопоглинаючим покриттям, що дозволяє нагрівати вміст балона до 150...180 °С, так що утворюється всередині нього пар за рахунок сонячного випромінювання нагрівається до температури 130...150 °С, а тиск при цьому залишається таким же, як атмосферний. Розпорошуючи воду всередині балона з перегрітою парою, отримують генерацію пари. Пара з балона відводиться в парову турбіну за допомогою гнучкого паропроводу і на виході з турбіни перетворюється в конденсаторі в воду, яка за допомогою насоса подається назад в балон. За рахунок запасу пара, накопиченого в балоні за світлу частину доби, САЕС може працювати в темний час доби і в погану погоду. САЕС можна розміщувати над землею, над морем або в горах, вибираючи місце розміщення турбогенератора так, щоб балони не заважали польотам літаків.

#### *Типи сонячних електростанцій.*

Усі СЕС поділяють на такі типи [8]:

– баштові, що отримали свою назву внаслідок того, що в центрі кожної з таких станцій стоїть вежа висотою від 18 до 24 м з перебувають на її вершині резервуаром з водою і насосною групою, що поставляє паровим турбінам пару, що отримується в результаті випаровування води за рахунок сонячних променів, що приходять від розташованих по колу від вежі геліостатів, рисунок 1.6

– тарілчасті, які отримали свою назву внаслідок того, що основними елементами таких станцій є схожі на супутникові тарілки параболічні дзеркала,

за допомогою яких сонячне випромінювання фокусується на розташовані в точці фокусу кожного дзеркала приймачі сонячної енергії, що здійснюють нагрів рідкого теплоносія до температури 1000 °С, при якій теплоносієм безпосередньо передається в генератор електроенергії (дивись рисунок 1.7). Ці електростанції мають схожий функціонал, як і у попередніх але складаються вони не з суцільного матеріалу, а мають конструкторну систему збору, що складається з кількох модулів. Зазвичай в таких установках, монтаж проводиться на висоті, при цьому встановлюються як приймачі, так і відбивачі;



Рисунок 1.6 – Баштові сонячні електростанції

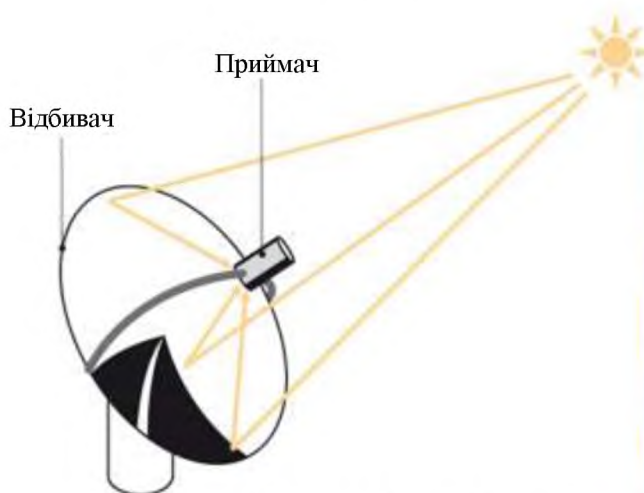


Рисунок 1.7 – Тарілчасті сонячні електростанції – СЕС, що використовують фотобатареї, рисунок 1.8.



Рисунок 1.8 – Схема СЕС, що використовують фотобатарей

СЕС цього типу в даний час дуже поширені, так як в загальному випадку СЕС складається з великого числа окремих модулів (фотобатарей) різної потужності і вихідних параметрів. Дані СЕС широко застосовуються для енергозабезпечення як малих, так і великих об'єктів (приватні котеджі, пансіонати, санаторії, промислові будівлі тощо.). Встановлюватися фотобатарей можуть практично скрізь, починаючи від покрівлі і фасаду будівлі і закінчуючи спеціально виділеними територіями. Встановлені потужності теж коливаються в широкому діапазоні, починаючи від постачання окремих насосів, закінчуючи електропостачанням невеликого селища;

– СЕС, що використовують параболоциліндричні концентратори, що складаються з дзеркал-відбивачів у формі жолобів і мають вид витягнутої по прямій параболи (в фокусі якої встановлюється трубка-приймач), що концентрує сонячне випромінювання в лінію, рисунок 1.9. Теплоносій, що протікає по трубці, нагрівається до температури 300...390 °С і в теплообмінних апаратах віддає тепло води яка, перетворившись на пару, надходить до турбогенератора, де і відбувається вироблення електричної енергії;

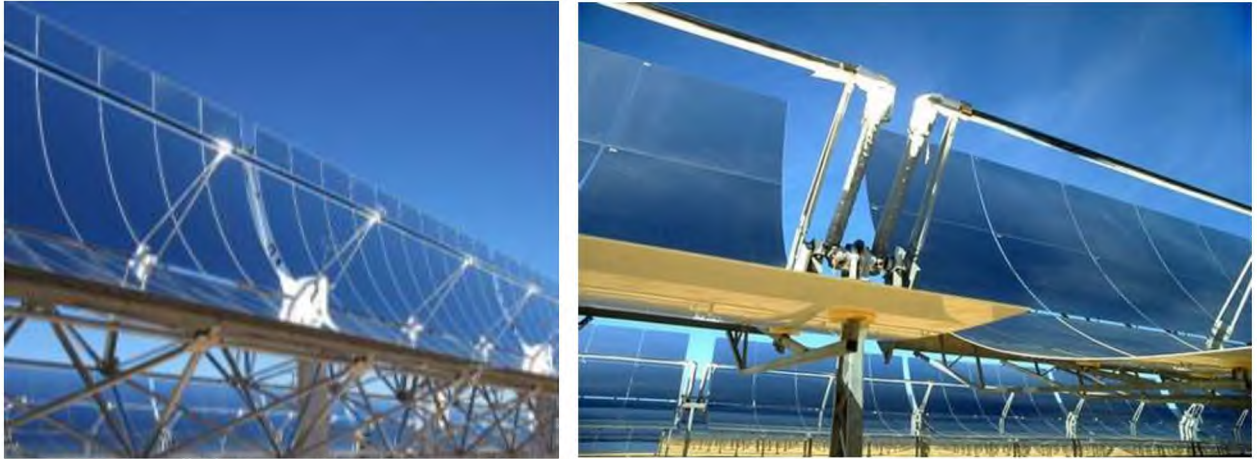


Рисунок 1.9 – СЕС, що використовує параболоциліндричні концентратори

– комбіновані СЕС, рисунок 1.10 [8].



Рисунок 1.10 – Комбіновані СЕС

Комбіновані електростанції можуть поєднувати в собі кілька типів сонячних електростанцій. Так наприклад на одній території станції будуть працювати установки тарільчатого або параболічного типу і сонячних батарей. Також, іншим прикладом може служити те, коли на сонячній електростанції додатково встановлюють теплообмінні конструкції для отримання гарячої води, яка може бути використана для гарячого водопостачання, опалення або технічних потреб. Часто на СЕС різних типів додатково встановлюють теплообмінні апарати для отримання гарячої води, яка використовується як для технічних потреб, так і для гарячого водопостачання та опалення. В цьому і полягає суть комбінованих СЕС. Також на одній території можлива паралельна установка концентраторів і фотобатарей, що теж вважається комбінованою СЕС;

– аеростатні сонячні електростанції, рисунок 1.11.



Рисунок 1.11 – Аеростатні сонячні електростанції

Сонячні аеростатні електростанції самі енергоефективні електростанції, вони здатні зібрати до 97 % сонячної енергії, при цьому цей тип споруд займає малі території поверхні, так як розташоване на поверхні землі обладнання займає надто мало місця, а громіздкий балон аеростата з фотоелектричним шаром, розташований в повітрі і здатний поглинати сонячні промені практично повністю в будь-який час доби, незалежно від погодних умов за рахунок здатності підніматися і опускатися на необхідну висоту.

Особливо варто відзначити, факт того, що розташування таких електростанцій не обмежується поверхнею землі і води. Китайський учений Ван Лі запропонував використовувати такий вид електростанцій в горах Тибету, з розташуванням балонів аеростатів вище шару хмар, при цьому електроенергією за розрахунками вченого забезпечать не тільки високогірні райони, а й в китайських провінціях;

– сонячні космічні електростанції, (CRTC) рисунок 1.12 [7, 9].

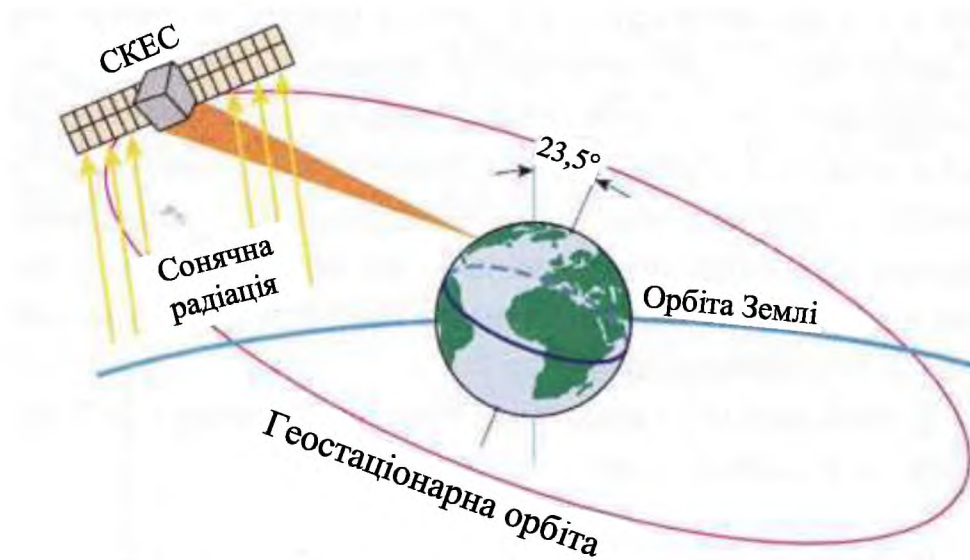


Рисунок 1.12 – Сонячна космічні електростанція

Оскільки наземні СЕС мають низьку ефективність, то в майбутньому альтернативою їх розміщення на землі може стати їх розміщення на геостационарній орбіті з радіусом близько 36000 км, що збігається з екваторіальною площиною Землі, нахиленої на  $23,5^\circ$  до площини становить  $1,4 \text{ кВт/м}^2$ , тобто в 2...2,5 рази більше, ніж в середньому на Землі, то стають очевидними суттєві переваги СКЕС перед наземними станціями.

Ідея СКЕС вперше була сформульована в США П.Є. Глезером (P.E. Glaser) в 1968 р. Пропонувалося розмістити на геостационарній орбіті сонячні батареї великої потужності, що забезпечені перетворювачами постійного струму в надвисокочастотне (СВЧ) електромагнітне випромінювання. Вибір геостационарної орбіти в якості місця базування СКЕС забезпечує зависання станції над певним пунктом на земній поверхні, а використання спрямованого пучка електромагнітного випромінювання дозволяє передати енергію зі станції на Землю, де вона може бути перетворена в електричний струм промислової частоти, рисунок 1.13.

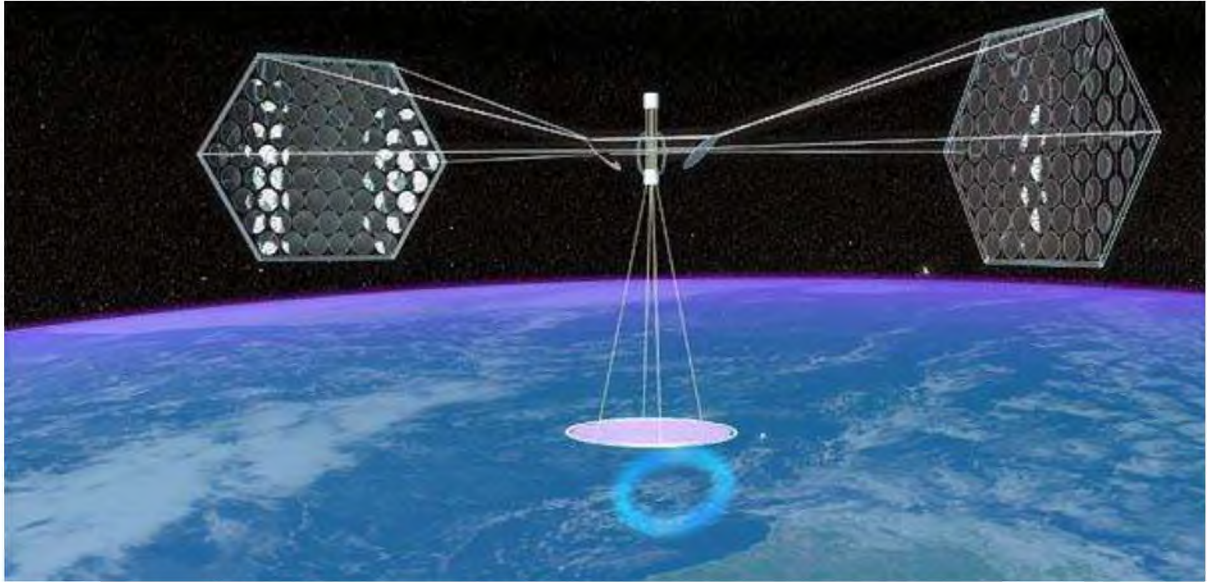


Рисунок 1.13 – Схема роботи сонячної космічної електростанції

На жаль, такі станції можуть бути побудовані тільки в майбутньому, так як для станції потужністю 10 ГВт площа сонячних батарей склала б  $50 \text{ км}^2$  при масі 10 тис. т.

Проведений аналіз дозволяє визначитися з основним типом СЕС на базі якої буде запропоновано спроектувати зарядну СЕС для електромобілів та plug-in гібридів потужністю 10 кВт. Отже це СЕС на основі фотоелектричних батарей. Цей вибір обумовлений тим, що сонячні панелі є найбільш поширеними, мають непоганий ККД, та основні елементи такої СЕС за масо-габаритними показниками та коштовністю значно випереджають всі інші типи СЕС.

## Література

1. Ахмедов Р.Б. и др. Гелиоэнергетика. Солнечные электрические станции. / Р.Б. Ахмедов и др. – М.: ВИНТИ, 1986. – 120 с.
2. Батлук В.А. Основы экологии и охраны окружающей среды. Учебное пособие / В.А. Батлук. – Львів: Афіша, 2001. – 333 с.
3. Бедрій Я.І. Основи екології та охорона навколишнього середовища: Навчальний посібник / Я.І.Бедрій.– К.: ЦУЛ, 2002. – 248 с.
4. Володин В.В. Энергия, век двадцать первый. Научно-художественная литература / В.В. Володин, П.М. Хазановский – М.: Дет. лит., 1989. – 142 с.
5. Солнечная электростанция // Матеріали сайту – 2014. – Режим доступу: <http://yznavai.ru/solnechnaya-e-lektrstantsiya/>.
6. Преобразование солнечной радиации в электрический ток // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://reforef.ru/outozub/Солнечная+энергетика+-+Проблемы+и+перспективыb/main.html>.

7. Види сонячних електростанцій // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [http://ishop.sutem.com.ua/articles/topics/solar\\_energy/SES](http://ishop.sutem.com.ua/articles/topics/solar_energy/SES).
8. Типы солнечных электростанций // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: [http://www.gigavat.com/ses\\_tipi.php](http://www.gigavat.com/ses_tipi.php).
9. Солнечные космические электростанции // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://www.studfiles.ru/preview/5354081/page:10/>.
10. Виды и типы: схемы солнечных электростанций электростанции // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <https://best-energy.com.ua/support/alternative-energy/solar-type#solar-dc1>.
11. Як заряджати електромобіль? // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <https://electrocars.ua/how-to-charge/>.
12. Типы зарядки электромобилей // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://ecoelectro.club/zaryadnye-stancii-dlya-elektromobilej/>.
13. Электромобили: инфраструктура, типы зарядок // Матеріали сайту – 2014. – Режим доступу: <http://автолента.рф/10-04-2014-elektromobili-infrastruktura-tipy-zaryadok>.
14. Солнечная энергия для электромобиля // Матеріали сайту – 2011. – Режим доступу: <http://ecoconceptcars.ru/2011/02/solnechnaja-jenergija-dlja.html>.
15. В Украине делают дешёвые солнечные станции для подзарядки электромобиля // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://www.epochtimes.com.ua/ru/novosti-nauki-i-tehniki/v-ukraine-delayut-deshyovye-solnechnye-stancii-dlya-podzaryadki-elektromobilya-121162>.
16. Солнечная станция // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://e-line.ua/ru/shop/solar-station/>.
17. Монтаж солнечных батарей, солнечных электростанций Подробнее: <https://magus.com.ua/p194362864-montazh-solnechnyh-batarej.html> // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <https://magus.com.ua/p194362864-montazh-solnechnyh-batarej.html>
18. Зарядні станції для електромобілів // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://www.elmiz.com/uk/produktsiya/zaryadni-stantsiji-dlya-elektromobiliv/product/view/5/32>.
19. Солнечная станция 10 кВт - гибридная (3 фазы, 2 MPPT) // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <https://kharkov.prom.ua/p295683770-solnechnaya-stantsiya-kvt;all.html>.

## Лекція № 20 (2 год.)

### Тема 7. Сонячні зарядні електростанції для інфраструктури автомобільного електротранспорту

## СХЕМИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛЯХ

### 1 Автономна сонячна електростанція постійного струму DC

Сонячна електростанція – спеціальна інженерна конструкція, яка служить для перетворення сонячної радіації в електричну енергію (постійний або змінний струм). Найпоширеніший тип сонячних електростанцій заснований на плоских фотоелектричних модулях монокристалічного або полікристалічного виду, які забезпечують перетворення сонячної радіації в постійний струм (DC). Залежно від застосовуваної схеми, постійний струм може інвертуватися в змінний (AC) або стабілізуватися для заряду акумуляторних батарей [10].

Нижче докладно описані принципи роботи і схеми сонячних електростанцій, які на сьогоднішній день успішно застосовуються і забезпечують найбільшу ефективність роботи.

Отже, за основу для побудови сонячної зарядної електростанції для електромобілів та plug-in гібридів потужністю 10 кВт виберемо СЕС на фотоелектричних модулях. У зв'язку з цим необхідно провести аналіз існуючих схем СЕС на фотоелектричних модулях та виходячи з нього вибрати найбільш підходящу для досягнення мети дійсної роботи.

Принцип дії автономної СЕС на постійний струм DC наступний. Сонячна радіація перетворюється в постійний електричний струм за допомогою сонячних панелей, які підключаються до контролерів заряду акумуляторів. Електрична енергія накопичується в акумуляторах в денний час доби, коли сонце активне, після чого може використовуватися в будь-який час для живлення споживачів постійного струму. Схема СЕС автономного типу постійного струму представлена на рисунку 2.1.



Рисунок 1 – Схема СЕС автономного типу постійного струму

Контролер заряду на базі ШИМ-контролера (PWM-тип) забезпечує заряд акумуляторів свинцево-кислотного типу AGM VRLA, GEL VRLA або FLA типів.

У разі застосування сучасних сонячних контролерів заряду, таких як BlueSolar MPPT, можливий заряд акумуляторів більш високого класу: OPzV (свинцево-кислотні необслуговувані елементи), OPzS (свинцево-сурм'янисті малообслуговувані), NiCd (нікель-кадмієві обслуговуються або малообслуговувані) або LiFePO<sub>4</sub> (літій-залізо-фосфатні акумулятори).

Даний вид СЕС встановлюють в тих випадках, коли потрібно організувати автономне вуличне освітлення або забезпечити електроживленням будь-якого іншого споживача постійного струму – охоронні системи, оперативні кола постійного струму, телекомунікаційні установки (радіозв'язок, супутниковий зв'язок, інтернет тощо).

Ефективність роботи – 97...98 %.

Складові: сонячні панелі; контролер заряду; акумулятор.

Робота в умовах «зеленого» тарифу: неможлива.

## 2 Автономна сонячна електростанція змінного струму АС

Принцип дії автономної СЕС змінного струму наступний. Сонячні батареї виробляють постійний струм в періоди сонячної активності, який надходить до контролера MPPT. Контролер заряду акумуляторів автоматично встановлює оптимальні налаштування (стабілізацію) постійного струму для заряду акумуляторів і виробляє якісний багатостадійний заряду батарей різних типів: AGM, GEL, OPzV, OPzS, NiCd або високотехнологічних літійових акумуляторів (Li-ion). Коли АКБ повністю заряджений, надлишок електричної енергії надходить на вхід інвертора напруги DC/AC, до виходу якого підключаються споживачі змінного струму (AC).

У періоди відсутності сонячної активності (вечір, ніч і рано вранці), електроенергія для споживачів змінного струму надходить з АКБ (DC) і перетворюється в змінну (AC) за допомогою інвертора напруги.

Сучасні функції інверторів дозволяють гнучко налаштовувати схему роботи сонячної електростанції, особливо це затребувано для приватних будинків і котеджів.

Схема СЕС автономного типу змінного струму представлена на рисунку 2.2.

Проаналізуємо основні режими роботи СЕС автономного типу змінного струму.

Режим 1. Автономне електропостачання. Дана схема може застосовуватися, коли немає мережі змінного струму. Вся накопичена за світловий день електроенергія в акумуляторах використовується у вечірній і нічний час для живлення споживачів змінного струму. Правильний розрахунок потужності сонячних панелей і достатня енергоємність АКБ дозволяють забезпечити повну автономність об'єкта.

Режим 2. Змішане електропостачання. Цей вид електростанцій вимагає наявності мережі змінного струму, яка використовується при розряді акумуляторів, щоб не відбувалося припинення подачі електропостачання будинку. Перевага даного типу в тому, що немає необхідності встановлювати більші масиви сонячних батарей і АКБ, бо завжди є можливість отримати нестачу електроенергії від мережі.



Рисунок 2 – Схема СЕС автономного типу змінного струму

Режим 3. Резервне електропостачання. В даному випадку схема СЕС передбачає налаштування інвертора таким чином, що АКБ залишається завжди зарядженим на 100 %. Лише невелика кількість виробленої сонячної

електроенергії витрачається на підтримку повного заряду акумуляторів, решта об'єму перетворюється на змінний струм і використовується для живлення активних споживачів, надлишок віддається в мережу згідно з умовами «зеленого» тарифу.

Описані вище типи СЕС затребувані для приватних будинків і котеджів, де повністю відсутня мережа або коли в мережі низька якість електроенергії. Також дані схеми нерідко застосовні для комерційного застосування: невеликі виробничі ділянки, системи телекомунікацій та будь-які інші області, де потрібно створити надійну систему резервного живлення з можливістю істотної економії електроенергії.

Ефективність роботи до 90...93 % при прямому і інвертованому режимах.

Складові: сонячні панелі; МРРТ-контролер; АКБ; гібридний інвертор; інколи – дизельний генератор.

### **3 Мережева сонячна електростанція змінного струму АС**

Принцип дії мережевої СЕС змінного струму наступний. Постійний струм, що виробляється сонячними батареями надходить на вхід сонячного інвертора, який перетворює постійного на змінний струм (DC/AC). Вихід від сонячного інвертора підключений до мережі змінного струму і до споживачів електроенергії. Дана схема відрізняється своєю простотою, однак конструкція має кілька особливостей. Так, електростанція працює тільки коли доступна електрична мережа змінного струму, а також напруга в мережі має перебувати в робочому діапазоні інвертора.

Схема мережевої СЕС змінного струму представлено на рисунку 2.3.

Даний вид СЕС затребуваний для будинків, дач, котеджів, де пропонуються вигідні умови «зеленого» тарифу. У денний час, коли споживання електроенергії, як правило, на мінімальному рівні, вироблена енергія передається в мережу по «зеленому» тарифу. У вечірній і нічний час, коли в будинку працює основна частина споживачів, енергія надходить з мережі. Таким чином, даний вид сонячної електростанції дозволяє істотно економити на витратах за оплату електроенергії, а якщо збільшити масив сонячних батарей, то домогосподарство буде отримувати прибуток за позитивну різницю виробленої і витраченої електроенергії за підсумками місяця.

Ефективність роботи – до 97 %.

Складові: сонячні панелі; сонячний PV - інвертор.

Робота в умовах «зеленого» тарифу: підтримується.

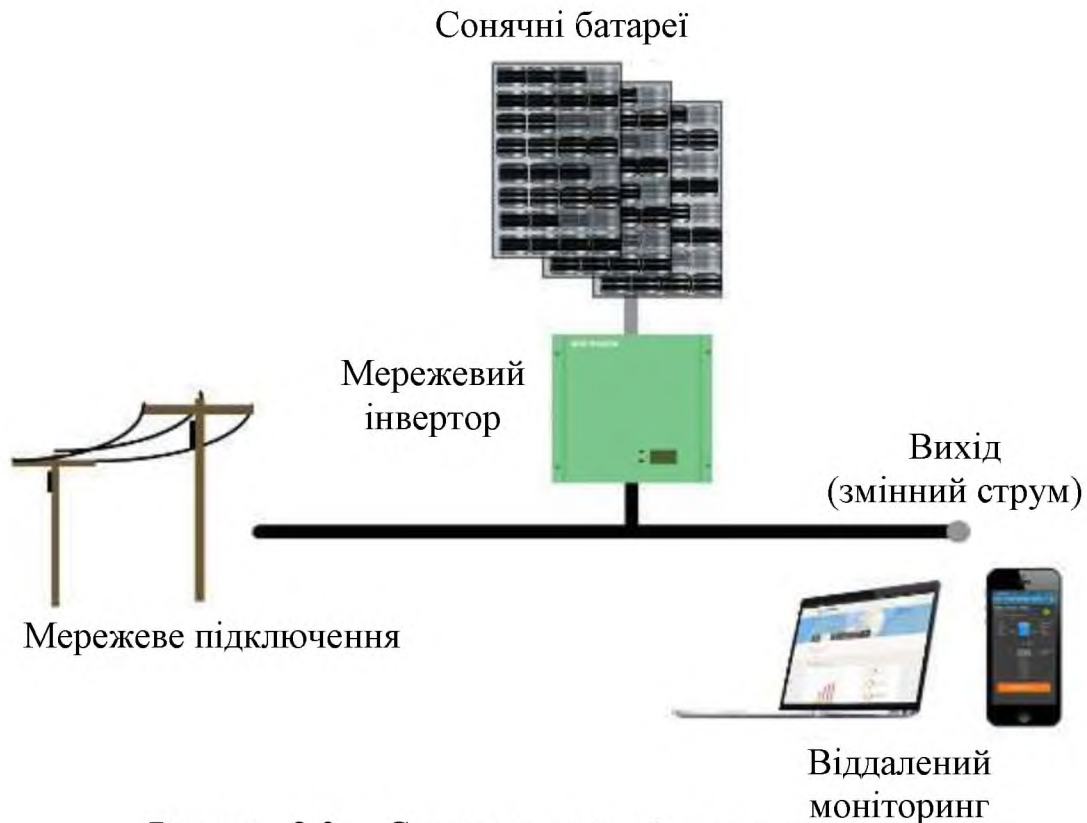


Рисунок 2.3 – Схема мережевої СЕС змінного струму

#### 4 Гібридна сонячна електростанція змінного струму АС

Сонячні батареї підключені до мережевого сонячного інвертора (DC/AC). Мережа змінного струму підключається на вхід гібридного інвертора (DC/AC), також до гібридного інвертора підключені АКБ. Вихід мережевого сонячного інвертора і гібридного інвертора об'єднані через розподільний щит і забезпечують електроживленням споживачів змінного струму.

Застосування гібридного інвертора з зарядним пристроєм в даному типі СЕС забезпечує ряд переваг – електростанція працює навіть при відсутності напруги в мережі змінного струму, а також в умовах нестабільної мережі. Користувачеві доступно кілька режимів роботи, які можуть гнучко налаштовуватися за бажанням і відповідно до пори року.

Схема гібридні мережеві СЕС змінного струму представлено на рисунку 2.4.

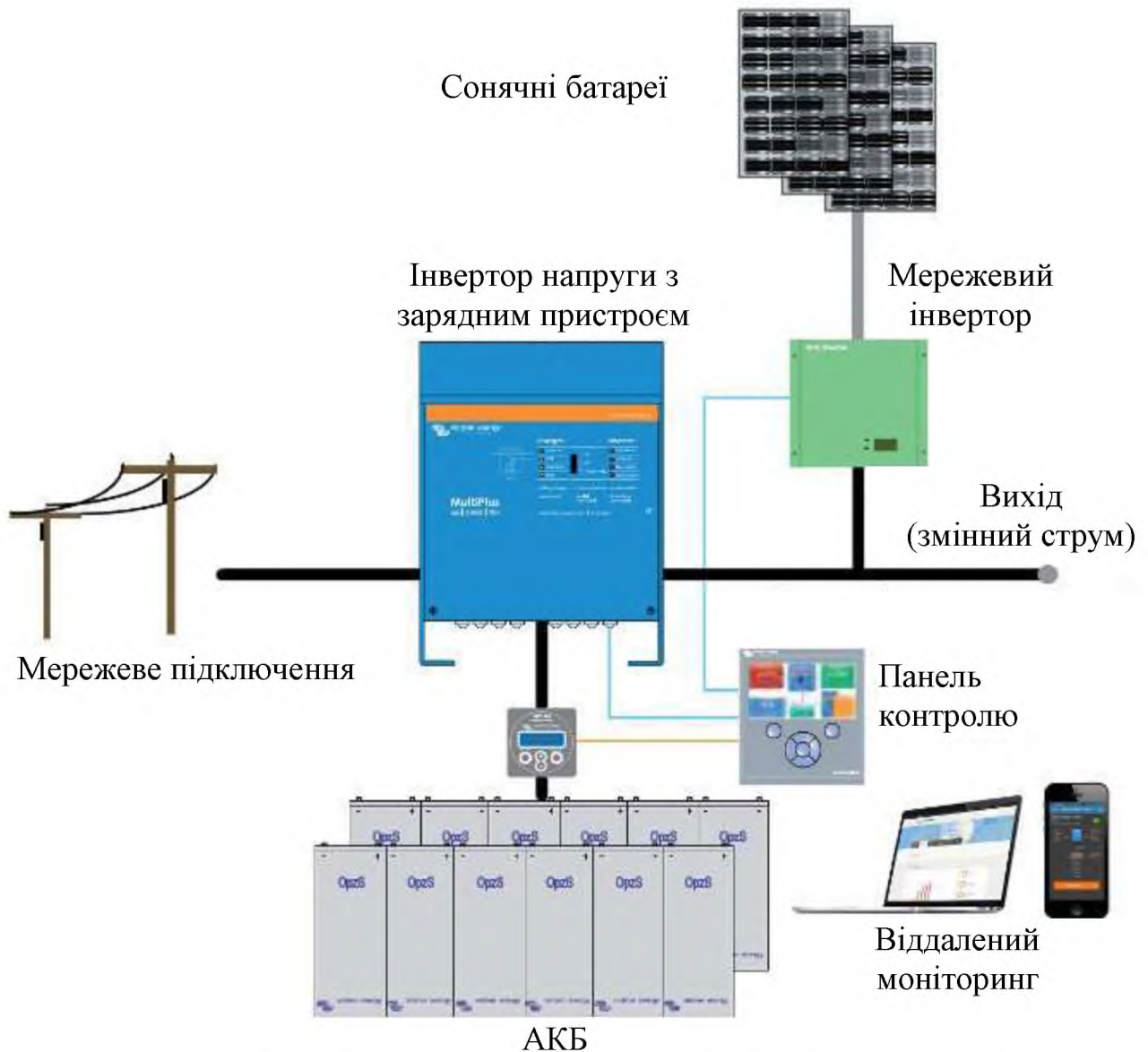


Рисунок 2.4 – Схема гібридні мережеві СЕС змінного струму

Режим 1. Автономна електростанція. Згенерована електроенергія накопичується в акумуляторах, мережевий інвертор подає змінну напругу на вихід гібридного інвертора, який здійснює заряд акумуляторів. Надлишок використовується споживачами або віддається в мережу змінного струму за умовами «зеленого» тарифу. У вечірній і нічний час електроживлення забезпечується гібридним інвертором від акумуляторів.

Для автономного електропостачання потрібно встановлювати достатню потужність сонячних батарей, щоб згенерованої електроенергії вистачало на достатній заряд акумуляторів, а їх ємності було досить, щоб покрити потреби споживачів.

У разі застосування гібридного інвертора Quattro з двома входами, до другого підключається дизельгенератор, яким система управляє автоматично відповідно до

заданих налаштувань. Наприклад, при досягненні встановленого порогового значення розряду акумуляторів, дизельгенератор буде заведений автоматично.

Режим 2. Змішане електропостачання. В даному випадку допускається незначний розряд акумуляторів або повний, після чого електроживлення буде переключено на мережу змінного струму. Сонячний інвертор продовжує роботу в будь-яких випадках і доповнює потужність системи, а також продовжує заряджати акумулятори. Надлишок передається в мережу за умовами «зеленого» тарифу.

Режим 3. Резервне електропостачання. У цьому випадку схема налаштована таким чином, що акумулятори задіяні тільки при відсутності електричної мережі (аварія, планове відключення, віялові відключення тощо). Сонячний інвертор виробляє електроенергію і забезпечує споживачів, надлишок передається в мережу за умовами «зеленого» тарифу.

Подібні СЕС затребувані для будинків, котеджів, офісів, готелів, готелів, баз відпочинку тощо, де потрібно створити систему гарантованого електроживлення, а також знизити залежність або повністю відмовитися від загальної мережі електропостачання.

Ефективність роботи – до 97 %.

## **5 Схеми з виділених груп споживачів**

Проектування сонячної електростанції на етапі будівництва - правильний крок, який дозволяє створити зручну схему розподілу електроенергії. Дуже важливо передбачити групи споживачів з різним пріоритетом, дана опція дозволяє збалансувати систему резервного живлення. Наприклад, перша група – охоплює електричні прилади з максимальним пріоритетом, які повинні працювати навіть при зникненні напруги в мережі: освітлення, системи охорони, опалення, зв'язку тощо. Друга група – прилади другорядної важливості, які вимагають коректного завершення роботи, при зникненні напруги в мережі їх можна відключити вручну або за допомогою дистанційного керування. А третя група – споживачі з низьким пріоритетом, без яких можна обійтися під час відключення електроенергії.

Таким чином, незалежно від типу сонячної електростанції, правильна схема забезпечує істотне підвищення комфорту в умовах аварійного відключення мережі.

Дизельний генератор – важливий елемент резервного або автономного електропостачання. По-перше, дизельгенератор забезпечує дуже тривалий резервне живлення при наявності додаткового бака з паливом. По-друге, генератор може покривати великі потреби в електричній потужності. По-третє, сучасні системи забезпечують інтелектуальне управління генератором. Такі інвертори як Quattro, підтримують два входи змінного струму і можуть самостійно запускати генератор, коли акумулятори розряджаються до певного рівня. Дана можливість дозволяє уникнути глибокого розряду акумуляторів, а також виключити ймовірність повного відключення електропостачання.

## Література

1. Ахмедов Р.Б. и др. Гелиоэнергетика. Солнечные электрические станции. / Р.Б. Ахмедов и др. – М.: ВИНТИ, 1986. – 120 с.
2. Батлук В.А. Основы экологии и охраны окружающей среды. Учебное пособие / В.А. Батлук. – Львів: Афіша, 2001. – 333 с.
3. Бедрій Я.І. Основы екології та охорона навколишнього середовища: Навчальний посібник / Я.І.Бедрій.– К.: ЦУЛ, 2002. – 248 с.
4. Володин В.В. Энергия, век двадцать первый. Научно-художественная литература / В.В. Володин, П.М. Хазановский – М.: Дет. лит., 1989. – 142 с.
5. Солнечная электростанция // Матеріали сайту – 2014. – Режим доступу: <http://yznavai.ru/solnechnaya-e-lektrstantsiya/>.
6. Преобразование солнечной радиации в электрический ток // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://reforef.ru/outozub/Солнечная+энергетика++Проблемы+и+перспективыb/main.html>.
7. Види сонячних електростанцій // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [http://ishop.sutem.com.ua/articles/topics/solar\\_energy/SES](http://ishop.sutem.com.ua/articles/topics/solar_energy/SES).
8. Типы солнечных электростанций // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: [http://www.gigavat.com/ses\\_tipi.php](http://www.gigavat.com/ses_tipi.php).
9. Солнечные космические электростанции // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://www.studfiles.ru/preview/5354081/page:10/>.
10. Виды и типы: схемы солнечных электростанций электростанции // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <https://best-energy.com.ua/support/alternative-energy/solar-type#solar-dc1>.
11. Як заряджати електромобіль? // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <https://electrocars.ua/how-to-charge/>.
12. Типы зарядки электромобилей// Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://ecoelectro.club/zaryadnye-stancii-dlya-elektromobilej/>.
13. Электромобили: инфраструктура, типы зарядок// Матеріали сайту – 2014. – Режим доступу: <http://автолента.рф/10-04-2014-elektromobili-infrastruktura-tipy-zaryadok>.
14. Солнечная энергия для электромобиля // Матеріали сайту – 2011. – Режим доступу: <http://ecoconceptcars.ru/2011/02/solnechnaja-jenergija-dlja.html>.
15. В Украине делают дешёвые солнечные станции для подзарядки электромобиля // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://www.epochtimes.com.ua/ru/novosti-nauki-i-tehniki/v-ukraine-delayut-deshyovye-solnechnye-stancii-dlya-podzaryadki-elektromobilya-121162>.
16. Солнечная станция // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://e-line.ua/ru/shop/solar-station/>.
17. Монтаж солнечных батарей, солнечных электростанций Подробнее: <https://magus.com.ua/p194362864-montazh-solnechnyh-batarej.html>// Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <https://magus.com.ua/p194362864-montazh-solnechnyh-batarej.html>

18. Зарядні станції для електромобілів // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://www.elmiz.com/uk/produktsiya/zaryadni-stantsiji-dlya-elektromobiliv/product/view/5/32>.

19. Солнечная станция 10 кВт - гибридная (3 фазы, 2 MPPT) // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <https://kharkov.prom.ua/p295683770-solnechnaya-stantsiya-kvt;all.html>.

## Лекція № 21 (2 год.)

### Тема 7. Сонячні зарядні електростанції для інфраструктури автомобільного електротранспорту

#### СОНЯЧНА ЗАРЯДНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ ДЛЯ ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

##### 1 Проекти та моделі сонячних зарядних станцій для електромобілів

Нульова емісія – це досить туманне поняття стало головним аргументом компаній, що просувають електричний транспорт. Але електромобілебудування, як і будь-яке виробництво, не може бути повністю екологічним. Дуже часто енергія, споживана сучасними електричними машинами, виробляється на твердо- і рідино-паливних електростанціях, які не тільки забруднюють навколишнє середовище, але і використовують поновлювані джерела. Отже, постійно йде пошук так званих нетрадиційних джерел енергії [14].

Сонячна енергетика поступово стає частиною нашого життя. Цей напрямок має обмежений потенціал, але збільшення споживання електроенергії за рахунок розвитку електромобілебудування змушує використовувати всі можливості по максимуму.

Сонячні панелі можуть застосовуватися як на самому електромобілі, для зниження навантаження на акумулятори, так і в якості основного джерела енергії на станціях зарядки. Отже, пропонується поглянути на кілька моделей сонячних зарядних станцій для електромобілів з точки зору грамотного використання простору. Оскільки ефективний дизайн сонячних панелей багато в чому буде визначати якість індустрії фотогальванічних елементів.

Evergreen Solar Fuel Station – робоча сонячна електростанція, яка розташована у Франкфурті. Тут не тільки можна зарядити свій електромобіль або електроскутер, але і замінити розряд батареї, рисунок 4.1.

Beautiful Earth Group solar EV Charger – перша в Нью-Йорку сонячна зарядна станція для електричного транспорту. Енергія виробляється фотоелектричними панелями Sharp (235 Вт), рисунок 4.2 (автомобіль на зарядці - електрична версія Mini E).



Рисунок 4.1 – Сонячна зарядна станція Evergreen Solar Fuel Station



Рисунок 4.2 – Сонячна зарядна станція Beautiful Earth Group solar EV Charger

E-Move Charging Station. Одна з різновидів компактних стоянок-зарядок для електричних скутерів і електромобілів. Енергію постачають вісім монокристалічних фотогальванічних елементів номінальною потужністю 1,8 кВт, рисунок 4.3.



Рисунок 4.3 – Сонячна зарядна станція E-Move Charging Station

Evoasis Solar Charging Station. Компанія Evoasis за основу сонячних електростанцій вирішила взяти занедбані бензоколонки Лондона. Велика площа сонячних панелей дозволить згенерувати достатню кількість енергії для швидкої зарядки електромобіля. Всередині станції знаходитиметься невелике кафе, в якому водії зможуть скрасити очікування, рисунок 4.4.



Рисунок 4.4 – Сонячна зарядна станція Evoasis Solar Charging Station

Geotecturas Green Gasoline Station. Дизайн цієї станції розробила відома компанія Geotectura. Приклад ефективного використання простору. Слід зазначити, що поруч побудовані вітрогенератори на той випадок, якщо сонячної енергії буде недостатньо, рисунок 4.5.

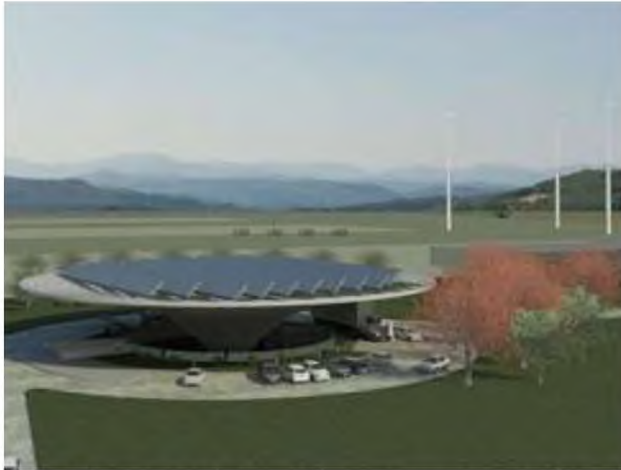


Рисунок 4.5 – Сонячна зарядна станція Geotecturas Green Gasoline Station

Envision Solars Solar Groves. «Сонячна Роща» – це автостоянка і електрозаправка одночасно. За словами виробників, енергії, що виробляється фотоелементами, вистачить на нічне освітлення і зарядки цілого парку електромобілів, рисунок 4.6.



Рисунок 4.6 – Сонячна зарядна станція – стоянка Envision Solars Solar Groves Energy Forest. Концепція «енергетичного лісу», який поєднує в собі виробництво енергії з сонця і вітру, рисунок 4.7.



Рисунок 4.7 – Сонячна зарядна станція Energy Forest

Solar Forest. Ідея схожа з Energy Forest. Промисловий дизайнер Невілл Марс продемонстрував своє бачення ефективної автостоянки електромобілів майбутнього. Зарядка відбувається від електричних «дерев», панелі яких, як живі рослини, самі повертаються до сонця, рисунок 4.8.



Рисунок 4.8 – Сонячна зарядна станція Solar Forest

Українська компанія Rentechno створює домашні сонячні зарядні станції для електромобілів. Така станція цілком може конкурувати з аналогічними розробками американського виробництва адже її вартість в 5 разів нижче [15].

Домашня версія сонячної станції для електромобілів виконана в формі «даху». За день така станція накопичує енергію, а вночі від неї можна зарядити один або кілька електромобілів, рисунок 4.9.



Рисунок 4.9 – Сонячна зарядна станція Rentechno

Поки такі станції виготовляють за індивідуальним замовленням, але в майбутньому, при достатньому обсязі замовлень, може бути налагоджено і серійне виробництво таких установок.

У Rentechno також збирають домашні настінні станції. Їх вартість стартує від 24 тис. грн. Вартість станцій-стовпчиків варіюється в межах 30...60 тис. грн: все залежить від необхідної потужності і швидкості зарядки.

Пропонуються 2 типи сонячних зарядних станцій: на 3 і 5 кВт. Станція на 3 кВт має розмір 3x5 м і підійде для одного електрокара, а 5x5 м – для двох.

Термін служби таких станцій складає від 5 до 20...25 років. За словами представників Rentechno, щоб використовувати таку домашню сонячну станцію, не потрібно спеціальних дозволів.

Зарядна станція української фірми e-line. Зарядна станція для електромобілів S1.CH-150, призначені для швидкісного режиму зарядки електротранспорту (від 15 до 30 хв) по стандартам CHAdeMO і CCS. Конструкція станції поєднує в собі високі функціональні вимоги (зарядна станція, джерело електроенергії на сонячних панелях і навіс) [16], рисунок 4.10.



Рисунок 4.10 – Сонячна зарядна станція e-line

Доступ до заправки відбувається за допомогою пластикової карти або коду доступу. Вбудований контролер в автоматичному режимі стежить за зарядкою, повідомляє про рівень заряду, готовності і поточних характеристиках

автомобіля, також ведеться автоматична охорона і відеоспостереження станції з можливістю передачі всіх даних про виробленому і заправленому електроенергію по інтернету на центральний пульт управління станціями. Завдяки сонячним панелям, станція може працювати в черговому режимі, при відключеному зовнішнього електропостачання.

## 2 Проект сонячної зарядної станції для електромобілів

Виходячи з проведеного аналізу конструкцій типів та будови сонячних електростанцій та у відповідності до поставленого завдання за основу для сонячної зарядної станції для електромобілів на 10 кВт вибрано гібридні мережеві СЕС змінного струму, рисунок 4.11.

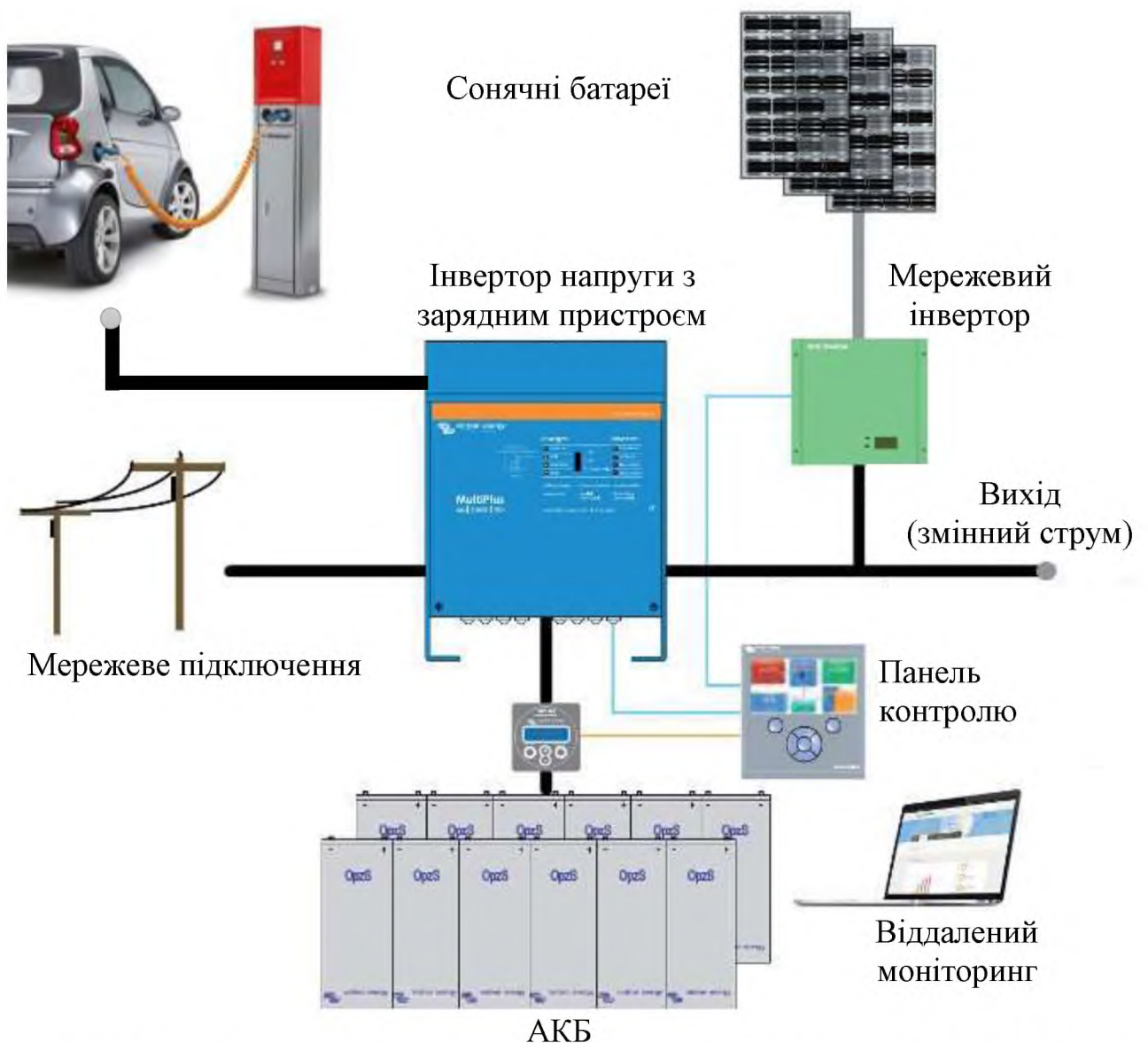


Рисунок 4.11 – Схема структурна зарядної станції для електромобілів на 10 кВт

Сонячні батареї підключені до мережевого сонячного інвертора (DC/AC). Мережа змінного струму підключається на вхід гібридного інвертора (DC/AC), також до гібридного інвертора підключені АКБ. Вихід мережевого сонячного інвертора і гібридного інвертора об'єднані через розподільний щит і забезпечують електроживленням споживачів змінного струму. Від гібридного інвертора йде вихід до зарядних станцій електромобілів.

Застосування гібридного інвертора з зарядним пристроєм забезпечує ряд переваг – електростанція працює навіть при відсутності напруги в мережі змінного струму, а також в умовах нестабільної мережі. Доступно кілька режимів роботи, які можуть гнучко налаштовуватися за технічними потребами і відповідно до пори року.

Режим 1. Автономна електростанція. Згенерована електроенергія накопичується в акумуляторах, мережевий інвертор подає змінну напругу на вихід гібридного інвертора, який здійснює заряд АКБ та подає напругу до зарядних станцій електромобілів. Надлишок використовується споживачами або віддається в мережу змінного струму за умовами «зеленого» тарифу. У вечірній і нічний час електроживлення забезпечується гібридним інвертором від АКБ.

Режим 2. Змішане електропостачання. В даному випадку допускається незначний розряд АКБ або повний, після чого електроживлення буде переключено на мережу змінного струму. Сонячний інвертор продовжує роботу в будь-яких випадках і доповнює потужність системи, а також продовжує заряджати АКБ. Надлишок передається в мережу за умовами «зеленого» тарифу.

Режим 3. Резервне електропостачання. У цьому випадку схема налаштована таким чином, що АКБ задіяні тільки при відсутності електричної мережі (аварія, планове відключення, віялові відключення тощо). Сонячний інвертор виробляє електроенергію і забезпечує споживачів, надлишок передається в мережу за умовами «зеленого» тарифу.

Подібні зарядні електростанції знижують залежність від загальної електромережі електропостачання або дозволяють повністю відмовитися від неї.

В якості АКБ у запропонованій зарядній станції пропонується використовувати вживані АКБ від електромобілів. Їх сумарна потужність повинна забезпечити 200 кВт·год (приблизно 8...10 літій-іонних АКБ електромобіля Nissan Leaf).

### **3 Конструкція сонячної зарядної станції для електромобілів на потужність сонячних елементів 10 кВт**

Запропонована сонячна зарядна станція для електромобілів розрахована на 10 кВт. Дах зарядної станції повністю складається з сонячних панелей та має три опори, рисунок 4.12. Отже, покрівля для сонячних панелей матиме розмір 9 x 8 м, що забезпечить розміщення фотоелектричних елементів номінальною потужністю 10 кВт. Висота опори – 3 м. Для забезпечення ефективної роботи

фотоелектричних елементів(максимальний ККД), дах (покрівля) сонячної зарядної електростанції повинна розташовуватися під кутом  $40^\circ$ .



Рисунок 4.11 – Схема конструкції сонячної зарядної станції для електромобілів на потужність сонячних елементів 10 кВт

Для досягнення максимальної вироблення енергії важливо дотримуватися необхідний кут нахилу і азимут. В регіонах України оптимальний азимут  $180^\circ$  (строго на південь). Оптимальний кут нахилу сонячної панелі для стаціонарної установки дорівнює географічній широті, для України  $40...50^\circ$  ( $0^\circ$  – горизонтально,  $90^\circ$  – вертикально). При установці панелей з можливістю зміни кута нахилу влітку слід збільшити, а взимку зменшити кут на  $12^\circ$ . Таким чином, для України маємо  $33^\circ$  влітку і  $57^\circ$  взимку [17].

Така сонячна зарядна станція для електромобілів розрахована на одночасну зарядку 4-х електромобілів. Еклектична енергія для заряду може надходити або від сонячних панелей, або від АКБ станції, або від загальної електричної мережі (якщо вичерпана енергія АКБ станції).

Коли АКБ станції повністю заряджені, то надлишок електроенергії, що генерує станція надходить до загальної електричної мережі живлення у відповідності до зеленого тарифу.

Склад обладнання сонячної зарядної станції для електромобілів на потужність сонячних елементів 10 кВт представлено в таблиці 4.1.

Основним елементом в обладнанні є зарядні станції виробництва ПАТ «ЕЛМІЗ» (Україна), що розроблені спеціально для швидкої зарядки електромобілів [18]. Висока потужність зарядних станцій (60 і 75 кВт) дозволяє заряджати електротранспорт за дуже короткий час. У цих зарядних станціях передбачена можливість поступового зниження зарядного струму в кінці процесу зарядки. Ця функція дозволяє заряджати електромобіль в режимі швидкої зарядки до 100 %.

Таблиця 4.1 – Обладнання сонячної зарядної станції для електромобілів на 10 кВт

№з/р	Обладнання	Кількість
1	Сонячна батарея KDM 250 (полікристалічна) Grade A KD-P250	40

2	Вживані АКБ Nissan Leaf	8...10
3	Інвертор напруги гібридний GROWATT 10000HY (10кВ)	1
4	Мережевий інвертор Goodwe GW10K-DT	1
5	Зарядна станція для електромобілів ПАТ «ЕЛМІЗ»	3

Корпус станції виконаний відповідно до вимог пило- та вологозахисності "IP55". Це дозволяє встановлювати зарядні станції на відкритій місцевості і не вимагає додаткових засобів захисту від несприятливих погодних умов.

Основні функції зарядної станції:

– зарядні станції дають можливість заряджати електромобілі і електробуси;

– можливість зарядки до 100 % з поступовим зниженням зарядного струму;

– підтримує напругу до 500 В постійного струму і струм до 250 А;

– роз'єми з'єднання 4-х стандартів;

– компактний - 1800x600x800 мм.

Технічні характеристики зарядної станції виробництва ПАТ «ЕЛМІЗ» представлені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики зарядної станції виробництва ПАТ «ЕЛМІЗ»

Максимальна потужність, кВт	60   75
Вхід	
Напруга живильної мережі, В	220/380 + 15 / -20%
Вхідний ном. струм при максимальній потужності, А	91   114
Коефіцієнт потужності	Більш 0,95
Вихід (постійний струм) GB / T, CCS, CHAdeMO (по запиту)	
Діапазон вихідної напруги, В	72...500
Максимальний струм, А	250
Вихід (змінний струм) Type 2	
Діапазон вихідної напруги, В	400 + 10%
Максимальний струм, А	3 x 32
Максимальна потужність, кВт	22
Корпус	
Вага, кг	480
Охолодження	Повітряне примусове
Технічні характеристики КПД,%	98
Кнопка аварійної зупинки	Передбачена
Умови навколишнього середовища	
Температура, °С	від -30 до +60
Максимальна вологість,%	95

Далі проведемо розрахунок генерованої електроенергії пропонованої сонячної зарядної станції для електромобілів на потужність сонячних елементів 10 кВт [19].

В таблиці 4.3 представлено показники генерованої електроенергії сонячною зарядною станцією на 10 кВт.

Таблиця 4.3 – Показники генерованої електроенергії

Місяць	Середньодобова генерація електроенергії, кВт·год	Середньомісячна генерація електроенергії, кВт·год
Січень	9	279
Лютий	15,9	429
Березень	27,8	861
Квітень	34,5	1040
Травень	39,5	1220
Червень	39,7	1190
Липень	38,7	1200
Серпень	35,9	1110
Вересень	28,2	845
Жовтень	19,6	609
Листопад	8,4	253
Грудень	6,4	198
Разом:	303,6	9234

У відповідності до таблиці 4.3 побудовано графік середньодобова генерація електроенергії сонячною зарядною станцією потужністю сонячних панелей 10 кВт, рисунок 4.12

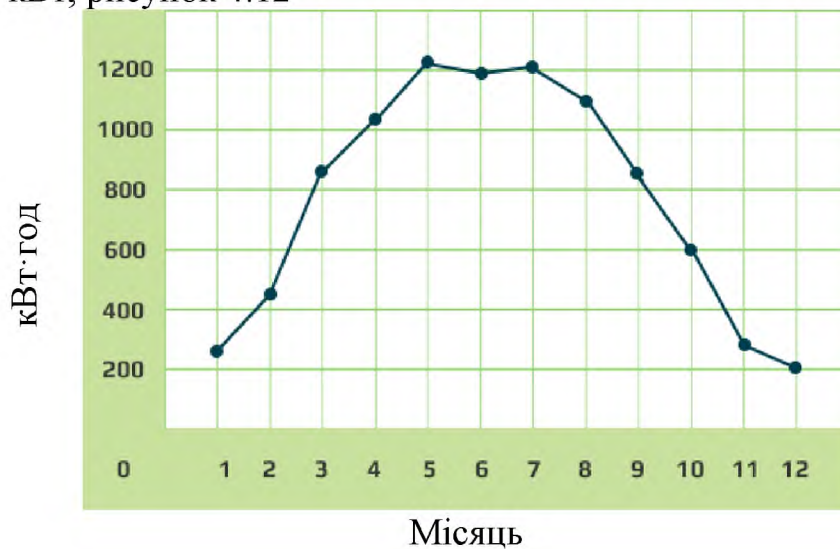


Рисунок 4.12 – Графік середньодобова генерація електроенергії сонячною зарядною станцією на 10 кВт

## Література

1. Ахмедов Р.Б. и др. Гелиоэнергетика. Солнечные электрические станции. / Р.Б. Ахмедов и др. – М.: ВИНТИ, 1986. – 120 с.
2. Батлук В.А. Основы экологии и охраны окружающей среды. Учебное пособие / В.А. Батлук. – Львів: Афіша, 2001. – 333 с.
3. Бедрій Я.І. Основи екології та охорона навколишнього середовища: Навчальний посібник / Я.І.Бедрій.– К.: ЦУЛ, 2002. – 248 с.
4. Володин В.В. Энергия, век двадцать первый. Научно-художественная литература / В.В. Володин, П.М. Хазановский – М.: Дет. лит., 1989. – 142 с.
5. Солнечная электростанция // Матеріали сайту – 2014. – Режим доступу: <http://yznavai.ru/solnechnaya-e-lektrstantsiya/>.
6. Преобразование солнечной радиации в электрический ток // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://reforef.ru/outozub/Солнечная+энергетика+-+Проблемы+и+перспективы/main.html>.
7. Види сонячних електростанцій // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [http://ishop.sutem.com.ua/articles/topics/solar\\_energy/SES](http://ishop.sutem.com.ua/articles/topics/solar_energy/SES).
8. Типы солнечных электростанций // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: [http://www.gigavat.com/ses\\_tipi.php](http://www.gigavat.com/ses_tipi.php).
9. Солнечные космические электростанции // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://www.studfiles.ru/preview/5354081/page:10/>.
10. Виды и типы: схемы солнечных электростанций электростанции // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <https://best-energy.com.ua/support/alternative-energy/solar-type#solar-dc1>.
11. Як заряджати електромобіль? // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <https://electrocars.ua/how-to-charge/>.
12. Типы зарядки электромобилей// Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://ecoelectro.club/zaryadnye-stancii-dlya-elektromobilej/>.
13. Электромобили: инфраструктура, типы зарядок// Матеріали сайту – 2014. – Режим доступу: <http://автолента.рф/10-04-2014-elektromobili-infrastruktura-tipy-zaryadok>.
14. Солнечная энергия для электромобиля // Матеріали сайту – 2011. – Режим доступу: <http://ecoconceptcars.ru/2011/02/solnechnaja-jenergija-dlja.html>.
15. В Украине делают дешёвые солнечные станции для подзарядки электромобиля // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://www.epochtimes.com.ua/ru/novosti-nauki-i-tehniki/v-ukraine-delayut-deshyovye-solnechnye-stancii-dlya-podzaryadki-elektromobilya-121162>.
16. Солнечная станция // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://e-line.ua/ru/shop/solar-station/>.
17. Монтаж солнечных батарей, солнечных электростанций Подробнее: <https://magus.com.ua/p194362864-montazh-solnechnyh-batarej.html>// Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <https://magus.com.ua/p194362864-montazh-solnechnyh-batarej.html>

18. Зарядні станції для електромобілів // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://www.elmiz.com/uk/produktsiya/zaryadni-stantsiji-dlya-elektromobiliv/product/view/5/32>.

19. Солнечная станция 10 кВт - гибридная (3 фазы, 2 MPPT) // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <https://kharkov.prom.ua/p295683770-solnechnaya-stantsiya-kvt;all.html>.

## Лекція № 22 (2 год.)

### Тема 8. Зарядні системи для автомобільного електротранспорту

#### ЕЛЕКТРОМОБІЛІ ТА ОСНОВНІ СПОСОБИ ЇХ ЗАРЯДУ

##### 1 Зарядка електромобіля від побутової мережі 220 В

Головною перевагою електрокарів є можливість заряджати їх будь-де, де є звичайна побутова електромережа. Більшість таких авто пристосовані для зарядки двома способами: змінним або постійним струмом. Останній призначений для під'єднання до станцій швидкої зарядки на кшталт CHAdeMO, яких в Україні справді поки що немає (рисунок .1) [11].

Роз'єм CHAdeMO створений компаніями The Tokyo Electric Power Company (TEPCO), Nissan, Mitsubishi, Fuji Heavy Industries (Subaru) і Toyota.

Також використовується автовиробниками: Citroën, Kia, Mitsubishi, Nissan, Peugeot і Toyota [12]. CHAdeMO може заряджати за потужністю до 62,5 кВт, заповнюючи батарею електромобіля Nissan Leaf до 80 % приблизно за 30 хв.



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд роз'єму CHAdeMO

Наповнення тягової батареї змінним струмом вимагає наявності зарядного пристрою, вбудованого в кожний електрокар. Більшість електричних авто заряджаються пристроєм потужністю 3,3 кВт. Це не так і багато. Приміром, потужність хорошого електрочайника може становити 2,2...2,4 кВт.

Найпростіший і найбільш поширений спосіб зарядки електричного авто – в гаражі від звичайної розетки, рисунок .2.



Рисунок .2 – Зарядка електромобіля в гаражі від звичайно розетки

Стандартна розетка побутової електромережі видає 220...230 В, 16 А. Відповідно, вона дозволяє безпечно під'єднувати прилади потужністю до 3,5 кВт. Електрокар впритул вписується в цей ліміт.

Слід зазначити, що старі радянські стандарти 1960-х обмежували потужність побутової мережі окремого помешкання на рівні 5 кВт. В сучасних квартирах та приватних будинках ця планка піднята до 15 кВт. Отже, електрокар можна заряджати навіть на дачі з доісторичною електромережею.

Кожен електрокар має (комплектується або надається, як додаткова опція) зарядний шнур, за допомогою якого можна підключати його до звичайної побутової електромережі, напругою 220 В, рисунок 3.3. Окрім власне зарядки, він слідує за процесом «залівки» батареї та має відповідний захист у випадку критичних ситуацій (тобто вбудовані запобіжники).



Рисунок .3 – Фірмовий зарядний шнур для електрокарів Renault

## **2 Режими та типи зарядки електромобілів**

Загалом розрізняють чотири режими зарядки електромобіля (в англійській термінології Mode). Американська класифікація способів зарядки

простіша і містить лише три рівні (Levels): звичайна домашня розетка, спеціальна домашня розетка з потужним струмом і швидкозарядна публічна станція.

Mode 1 – найбільш базовий. Це зарядка змінним струмом від побутової мережі, коли в звичайну розетку вмикається кабель без додаткових захисних пристроїв. Він не гарантує безпеки у разі перегріву кабеля/розетки чи короткого замикання, тому не використовується в сучасних електромобілях. Час зарядки стандартного електрокара з батареєю у 20...25 кВт·год становить 6...8 год.

Mode 2 – те ж саме, що і перший варіант, але із застосуванням фірмового кабелю із захистом. Він слідкує за тим, щоби не було короткого замикання чи перегріву кабеля, за допомогою примітивних світлових індикаторів інформує про процес заряду. На відміну від зарядних пристроїв, скажімо, ноутбуків, здатних працювати в діапазоні напруги 100...240 В, автомобільні зарядки розраховані або на Європу (220/230 В), або на США (120 В).

Mode 3 – зарядка змінним струмом підвищеної потужності із використанням окремої розетки, яка по суті є спеціальною зарядною станцією. Вона має необхідний захист, слідкує за процесом заряду, а під'єднання авто здійснюється через вбудований в неї кабель з відповідним конкретному електрокару роз'ємом. Розетка типу Mode 3 може бути встановлена будь-де – дома, в офісі, на вулиці. Залежно від типу використаного кабеля (однофазного або трифазного), зарядка може видавати від 7,2 до 43 кВт. Відповідно, час «заправки» стандартного сучасного електрокара становитиме від 4 год до кількадесят хв.

Mode 4 – найшвидший на даний момент спосіб зарядки електрокара. На відміну від попередніх варіантів, тут використовується постійний струм. Популярний японський стандарт зарядної станції CHAdeMO видає до 62,5 кВт енергії, що дозволяє зарядити акумулятор стандартного електрокара за 20...30 хв. Тесла оснащує свої авто великими за ємністю батареями (70, 85, 90, 100 кВт·год) і використовує свій спосіб швидкої зарядки. Фірмові станції Tesla Supercharger видають 135 кВт електроенергії.

Зарядка способом Mode 4 має свою особливість: по факту акумулятор швидко наповнюється лише на 80 %, решта 20 % ємності заливаються дуже повільно. Це зроблено для того, щоби не пошкодити тягову батарею.

Швидкозарядних станцій для електрокарів в Україні, на жаль, поки немає. Вони досить дорогі (від \$15...20 тис.) і вимагають серйозної підготовки електромережі.

Тепер проаналізуємо зарядні станції за рівнями потужності (американська класифікація), в США їх називають Level 1, 2, 3 [13].

Рівень 1 (Level 1) – це найповільніша зарядка змінним струмом до 16 А. Для США 16 А обтяжені 120 В і максимум на що можна розраховувати – це 1,92 кВт пікової потужності. Для середнього електромобіля це означає, що доведеться чекати близько 12 год. до повної зарядки. З такою швидкістю будь-

який автомобіль можна заряджати без спеціальної інфраструктури, просто встромивши адаптер в розетку.

У середині типового зарядного пристрою знаходяться засоби захисту і регулювання струму, які замикають ланцюг, тільки коли роз'єм застромлять в гніздо зарядки автомобіля. Найчастіше в комплектації є таке зарядний пристрій, максимум на 3.3 кВт (рисунок 3.4). У домашньому виконанні така зарядка навряд чи буде коштувати більше \$ 500, а в вуличному їх вже не ставлять, але є деяка кількість старих зарядок 1-го рівня.



Рисунок 4 – Порти Nissan Leaf. Зліва CHAdeMO (Level 3) до 50 кВт.  
Праворуч – стандартний для США SAE J1772 (Level 1/2).

Рівень 2 (Level 2) – до 7 кВт пікової потужності (240 В, 30 А). У домашньому виконанні ціна зарядок починається з \$ 500, у вуличному з \$ 1000.

Зарядки першого і другого рівня використовують змінний струм. В автомобілі, відповідно, розташовується зарядний пристрій, який випрямляє струм і заряджає акумулятори, рисунки 4, 5.



Рисунок 5 – Зарядна станція другого рівня (Нідерланди)

Зарядка третього рівня, найпотужніша, швидка зарядка. 300...600 В, 100 А і більше. На ділі ж зазвичай мова йде про 50 кВт. Вони здатні зарядити автомобільну батарею від 0 до 80 % за 30 хв. Подальша зарядка на них або взагалі

неможлива, або йде зі значно меншою потужністю, як у зарядки 1-2 рівня, щоб не пошкодити акумулятор.

Отже, порівнюючи європейські і американські зарядні станції можна зробити висновок, що в Європі схожа ситуація, стандарт IEC 62196 визначає наступні потужності зарядок (рисунок 3.6):

Mode 1 – 240 В 16 А, той же Level 1, тільки в Європі 220 В, так що потужність в два рази вище;

Mode 2 – 240 В 32 А (= Level 2);

Mode 3 – 690 В, 3-фазний змінний струм, 63 А, тобто 43 кВт (частіше встановлюються зарядки з половиною від цього, 22 кВт), такого в США вже немає, це швидка зарядка змінним струмом;

Mode 4 – швидка зарядка постійним струмом, допускає 600 В і до 400 А, тобто 240 кВт максимум.



Рисунок 6 – Штекери SAE Combo2 зарядки (зліва, зарядка в режимі Mode 4) і Mennekes (праворуч, Mode 1,2,3), основні стандарти для Європи

Виходить, в Європі приблизно такі ж стандарти потужності зарядок, що і в США, тільки з'являється Mode 3 – швидка зарядка змінним струмом. Перші два типи – повільні зарядки, швидкість зарядки на них вимірюється годинами, потужні ж можуть зарядити акумулятор типового електромобіля за півгодини.

Таким чином, ключове поділ зарядок: звичайні і швидкі зарядки. Звичайні – Level 1, Level 2 для США, Mode 1, Mode 2 для Європи. Швидкі – Level 3 в США, Mode 3, Mode 4 в Європі. Коли говорять в статистиці про тисячі встановлених зарядок, майже завжди мова йде про звичайні зарядок. І, звичайно, їх встановлюють помітно менше, ніж продають автомобілів, хоча і не на порядок.

Для plug-in гібридів швидкі зарядки не потрібні, не той обсяг батареї, щоб вона могла переварити таку потужність при поточних технологіях. На даний момент з усіх plug-in гібридів тільки Mitsubishi Outlander PHEV підтримує швидку зарядку.

### 3 Стандарти до зарядних станцій

Далі варто пробігтися по стандартам. Для швидкої зарядки найбільша кількість станцій встановлено під стандарт CHAdeMO. Цей стандарт використовується на автомобілях Nissan, Mitsubishi (так само в альянс входять Toyota, Subaru). Незважаючи на те, що сам роз'єм виглядає дуже потужним, розрахований він на використання струму з напругою 500 В до 125 А, тобто на 62,5 кВт (рисунок 3.1). Організація CHAdeMO повідомляє, що в межах тієї ж специфікації, використовуючи те ж обладнання, струм може бути збільшений до 200 А, а загальна потужність до 100 кВт. Насправді зараз немає автомобілів, крім Tesla, для яких могла б знадобитися потужність вище 50 кВт, так як більшу частину сучасних акумуляторів не рекомендується заряджати струмом великим 2С.

У Tesla пропріетарний стандарт. У американських автомобілів використовується свій, несумісний ні з чим роз'єм, так що використання публічних зарядок, відмінних від суперзарядок компанії, можливо тільки з використанням адаптера. Правда кілька адаптерів йде в комплекті з машиною. У європейських машин використовується стандартний в Європі роз'єм Mennekes, який сумісний з Mode 1, 2, 3 зарядками (рисунок 3.6). Власні суперзарядки Tesla розраховані на потужність до 150 кВт, але поки налаштовані на потужність в 135 кВт.

У США стандарт для більшої частини автомобілів – SAE (J1772), він використовується для Level 1, 2 зарядки (рисунок 3.4). І зараз починає розвиватися стандарт SAE Combo для Level 3 зарядки, який використовує частину конекторів SAE для встановлення домовленості, але постійний струм передає по окремим конекторам. В 2014 р. можливість швидкої зарядки за стандартом SAE Combo отримали перші автомобілі – Chevrolet Spark EV і BMW i3 в США. Станцій швидкої зарядки для цього стандарту поки практично немає, але у CHAdeMO підтримка тільки Nissan і Mitsubishi, всі інші виробники (Volkswagen, BMW, GM, Ford і т.д.) будуть вкладатися в штатах в розвиток швидких зарядок SAE Combo. Швидка зарядка за стандартом допускає постійний струм з напругою 500 В і силою струму до 200 А, тобто потужністю 100 кВт.

В Європі основний стандарт Type 2 більш відомий за типом використовуваного роз'єму, розробленого однойменною німецькою компанією – Mennekes. З його використанням допустима зарядка в Mode 1, 2, 3. Тобто до 43 кВт змінним струмом. У Франції та Італії електричні компанії запропонували Type 3 роз'єм, конструкція якого включає захист контактів, і внаслідок цього здешевлює вартість станції, в той же час її потужність обмежена Mode 2 зарядкою і, судячи по товщині конекторів, безальтернативно. Але Європейська Комісія вирішила, що в Європі повинен використовуватися тільки Type 2 роз'єм.

Основні стандарти зарядки без пропріетарного Tesla і японського CHAdeMO представлені на рисунку 7.

	Typ 1 / USA	Typ 2 / Europa	GB / China
AC	 SAE J1772 / IEC 62196-2	 IEC 62196-2	 GB Part 2
DC	 IEC 62196-3	 IEC 62196-3	 GB Part 3 / IEC 62196-3
COMBO	 SAE J1772 / IEC 62196-3	 IEC 62196-3	

Рисунок 7 – Основні стандарти зарядки

А в Китаї використовується роз'єм GB / T 20234, який часто називають просто GBT. Він хоч і підозріло схожий на європейський Mennekes, але з ним не сумісний.

Для зарядки постійним струмом в Європі запропонований роз'єм Combo2 аналогічний американському SAE Combo, тільки зроблений не навколо J1772, а сумісний з Mennekes. Зарядок за цим стандартом ще майже не встановлено, а сам стандарт тільки недавно затверджений. Але все свіжі автомобілі обладнані відповідним роз'ємом.

Так що і в США і в Європі ситуація зі стандартами швидких зарядок дуже схожа. Японські виробники підтримують CHAdeMO, яке в усьому світі однакова, у Tesla свій стандарт, але різний в США і Європі, всі інші виробники просувають в США SAE Combo, а в Європі SAE Combo2, рисунок 8.

IEC DC Charging Systems				
	System A CHAdeMO (Japan)	System B GB/T (PRC)	System C	
			COMBO1 (US)	COMBO2 (DE)
Connector				
Vehicle Inlet				
Communication Protocol	CAN		PLC	

Рисунок 8 – Стандарти швидкої зарядки постійним струмом в різних країнах

## Література

1. Ахмедов Р.Б. и др. Гелиоэнергетика. Солнечные электрические станции. / Р.Б. Ахмедов и др. – М.: ВИНТИ, 1986. – 120 с.
2. Батлук В.А. Основы экологии и охраны окружающей среды. Учебное пособие / В.А. Батлук. – Львів: Афіша, 2001. – 333 с.
3. Бедрій Я.І. Основы екології та охорона навколишнього середовища: Навчальний посібник / Я.І.Бедрій.– К.: ЦУЛ, 2002. – 248 с.
4. Володин В.В. Энергия, век двадцать первый. Научно-художественная литература / В.В. Володин, П.М. Хазановский – М.: Дет. лит., 1989. – 142 с.
5. Солнечная электростанция // Матеріали сайту – 2014. – Режим доступу: <http://yznavai.ru/solnechnaya-e-lektrstantsiya/>.
6. Преобразование солнечной радиации в электрический ток // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://reforef.ru/outozub/Солнечная+энергетика+-+Проблемы+и+перспективыb/main.html>.
7. Види сонячних електростанцій // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: [http://ishop.sutem.com.ua/articles/topics/solar\\_energy/SES](http://ishop.sutem.com.ua/articles/topics/solar_energy/SES).
8. Типы солнечных электростанций // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: [http://www.gigavat.com/ses\\_tipi.php](http://www.gigavat.com/ses_tipi.php).
9. Солнечные космические электростанции // Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://www.studfiles.ru/preview/5354081/page:10/>.
10. Виды и типы: схемы солнечных электростанций электростанции // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <https://best-energy.com.ua/support/alternative-energy/solar-type#solar-dc1>.
11. Як заряджати електромобіль? // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <https://electrocars.ua/how-to-charge/>.
12. Типы зарядки электромобилей// Матеріали сайту – 2017. – Режим доступу: <http://ecoelectro.club/zaryadnye-stancii-dlya-elektromobilej/>.
13. Электромобили: инфраструктура, типы зарядок// Матеріали сайту – 2014. – Режим доступу: <http://автолента.рф/10-04-2014-elektromobili-infrastruktura-tipy-zaryadok>.

## Лекція № 23 (2 год.)

### Тема 8. Зарядні системи для автомобільного електротранспорту

#### 1. Гальмівна система електромобіля

Будь-які рухомі транспортні засоби мають велику кінетичну енергію, яка повинна кудись діватися, коли відбувається процес гальмування. Від даної істини відштовхувалися всі інженери, розробляючи систему гальмування для електричного транспорту. Ми теж візьмемо її на озброєння, так як весь сьогodнішній матеріал буде присвячений тому, як можна використовувати цю енергію.

Куди дівається кінетична енергія автомобіля з ДВЗ в момент гальмування? У момент гальмування гальмівні колодки притискаються до металевого гальмівного диску, що закріплений на осі автомобіля, тим самим створюючи тертя, яке і призводить до уповільнення обертання колеса. При цьому вся кінетична енергія, наприклад, легкового автомобіля вагою в півтори тонни, який їде зі швидкістю, скажімо, в 100 км / год перетворюється в тепло і йде в гальмівні колодки просто стираючи їх. Тобто, вона не тільки не приносить користі, але ще й має негативний вплив.

Але в електромобілях все інакше. Так як питання збільшення запасу ходу АКБ все ще відкрите, дану енергію інженери вирішили використовувати для її підзарядки. Економія виходить помітною, і на сьогodнішній день важко знайти електромобіль, який не використовує рекуперативне гальмування.

#### 2. Принцип роботи гальмівної системи електромобіля

У звичайному автомобілі використовується гідравлічний тиск для того, щоб створити силу тертя в барабанному або дисковому гальмі. Після чого кінетична енергія перетворюється в теплову енергію. Цей тиск створюється водієм в момент натискання педалі гальма, який зазвичай посилюється допоміжною системою для зменшення зусилля. Таким чином, прискорення уповільнення автомобіля пропорційно зусиллю тиску ноги на педаль гальма. Все просто і надійно. Але енергію ми втрачаємо.

В електричному транспорті, коли ми намагаємося зберегти енергію гальмування для подальшого використання, нам необхідно використовувати дві системи гальмування:

1) Першою вступає в дію електрична система, вона ще має назву рекуперативної системи. Рекуперативна система гальмування - це така система, яка повертає частину витраченої енергії на гальмування.

Тобто замість класичного гальмівного механізму у вигляді диска або барабана виступає тяговий електродвигун, який переходить у генераторний режим. На першому етапі гальмування, коли швидкість обертання коліс ще досить висока, електрогенератор перетворює енергію обертання колеса в електроенергію. На валу електродвигуна виникає гальмівний момент, який і призводить до зниження швидкості автомобіля.

При обертанні ротора в його обмотці і обмотці статора виникають струми протилежного напрямку. Взаємодія цих струмів призводить до гальмування ротора. При цьому на вироблення електроенергії витрачається запасена транспортним засобом кінетична енергія, і по її виснаженню (перетворенні в тепло і електроенергію) відбувається зниження швидкості автомобіля.

2) Другим ешеленом йде більш ефективно, з точки зору уповільнення автомобіля до нульової швидкості, гальмування з використанням тертя. Тобто звичайна гідравлічна система гальмування вступає в дію.

Узгодженням дій двох гальмівних підсистем гідравлічної і електричної займається спеціальний електронний блок, який виступає посередником між водієм, що тисне на педаль гальма, і електрогідравлічною системою гальмування. Таким чином, втрачається прямий зв'язок водія з гальмами, і завдання цієї електронної системи зробити так щоб водій цього не помітив. Системі управління гальмами доводиться постійно визначати, яким має бути прискорення уповільнення у відповідь на натиснення педалі користувачем, і яку систему в якій пропорції задіяти, щоб і енергію максимально зберегти і зробити уповільнення пропорційним зусиллю, прикладеному до педалі гальма.

Систематизування всього приведеного у вигляді послідовності процесів, що відбуваються.

1. При гальмуванні електромобіля тяговий електродвигун відключається від джерела живлення (акумулятора) і переходить у генераторний режим, самостійно виробляючи енергію.

2. У такому режимі в обмотках ротора і статора виникають протилежно спрямовані струми.

3. На валу електромотора виникає гальмівний момент. Він забезпечує гальмування транспортного засобу, знижуючи його швидкість.

4. Одночасно з цим збережена машиною кінетична енергія переходить в електроенергію і тепло.

5. Отримана електрична енергія надходить в акумулятор.

Таким чином ми можемо зробити висновок, що чим частіше гальмує автомобіль, тим більше заряджається його акумуляторна батарея.

Але, також слід зазначити, що рекуперативного гальмування має деякі обмеження.

1. Перше – особливість сучасних акумуляторів така, що їх підзарядка може відбуватися тільки при певних значеннях струму і напруги, що дещо обмежує діапазон використання регенерації енергії за допомогою рекуперації.

2. Друге – неможливо заряджати повністю заряджену батарею. Друге зауваження не є таким істотним для електромобілів, так як рекуперація для них – це єдиний спосіб підзарядки на ходу, на відміну від гібридів, які заряджаються від власного двигуна внутрішнього згорання. Однак це один з факторів, який наочно нам показує, що тягову АКБ електромобіля необхідно заряджати не повністю, а десь на 90%. Також сучасні літій-іонні акумулятори не надто «люблять» бути повністю зарядженими – це пов'язано з протіканням в них електрохімічних процесів, які сприяють прискороної їх деградації.

3. Третьою особливістю, а скоріше навіть недоліком, даної системи є обмеженість використання. Рекуперація мало ефективна в місті, особливо при русі в щільному потоці, електромобіль практично не може нормально розігнатися. У підсумку виробляється мало енергії.

### **3. Ефективність рекуперативної системи електромобіля**

Виходячи з третьої особливості рекуперативної системи виникає питання про її ефективності.

Якщо говорити про ККД, то виробники, найчастіше, називають цифру 60-70% повернення кінетичної енергії, втраченої під час гальмування. Але також слід враховувати той факт, що в принципі енергії, на гальмування, витрачається небагато, і цифри не можна назвати вражаючими. І знову-таки все відносно. Адже ситуація набагато покращується при русі з гірки і гальмуваннях на високій швидкості. Іноді запас ходу транспортного засобу збільшується при цьому на 15-20%. А це вже пристойний результат.

Також слід зазначити, що розмір транспортного засобу грає вирішальне значення. Все через те, що чим більше і важче автомобіль, тим більше він виділяє кінетичної енергії при гальмуванні.

В даному випадку невеликі електричні транспортні засоби перебувають в менш виграшному положенні, оскільки не можуть протистояти законам фізики. Таким чином, якщо порівнювати електрокари за габаритами можна бути впевненим, що чим більше електромобіль, тим вище показники ефективності його рекуперативної системи.

Отже, гальмівна система електромобіля або гібрида складається з двох підсистем. Першою є електрична система (рекуперативного гальмування), а другою – гідравлічна (звичайні фрикційні гальма). Завдяки рекуперативному гальмуванню ми маємо можливість зберігати нехай і не 100%, але більшу частку кінетичної енергії. Однак наука не стоїть на місці. Інженери проводять тисячі годин, тестуючи і вдосконалюючи алгоритми роботи систем управління гальмуванням, щоб зробити їх швидкими і надійними.

## Лекція № 24 (2 год.)

### Тема 8. Зарядні системи для автомобільного електротранспорту

#### 1. ОСНОВНІ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧІ ЧИННИКИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ВЕЛИЧИНУ НАПРУГИ

На вихідну напругу джерел вторинного електроживлення (ДВЕЖ) впливають *дестабілізуючі чинники*:

- зміна вхідної напруги  $\Delta U_0$ ;
- зміна струму навантаження  $\Delta I_H$ ;
- зміна температури навколишнього середовища  $\Delta t^0$ ;

$$U_H = f(\Delta U_0; \Delta I_H; \Delta t^0).$$

Тоді зміна вихідної напруги  $\Delta U_H$  можна представити у виді.

$$\Delta U_H = \frac{\partial U_H}{\partial U_0} \Delta U_0 + \frac{\partial U_H}{\partial I_H} \Delta I_H + \frac{\partial U_H}{\partial t^0} \Delta t^0.$$

**Нестабільність вихідної напруги**  $\partial U_H$  характеризує точність підтримки напруги на заданому рівні і визначається як відношення зміни вихідної напруги ДВЕЖ  $\Delta U_H$  до номінального значення вихідної напруги  $U_H$  при заданих змінах вхідної напруги, струму навантаження і температури навколишнього середовища:

$$\partial U_H = \frac{\Delta U_H}{U_H} = \frac{(\Delta U_H)_U}{U_H} + \frac{(\Delta U_H)_I}{U_H} \pm \frac{(\Delta U_H)_{t^0}}{U_H}.$$

Розмір  $\partial U_H$  задається у відсотках від номінальної напруги ( $\partial U_H = 0,1; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 10,0\%$ ) і дорівнює сумі часткових нестабільностей вихідної напруги по напрузі, струму і температурі.

**Нестабільність по напрузі**  $\frac{(\Delta U_H)_U}{U_H}$  - це припустима зміна вихідної напруги при заданих межах зміни вхідної напруги мережі, що харчує, і незмінному струмі навантаження.

**Нестабільність по струму**  $\frac{(\Delta U_H)_I}{U_H}$  - це припустима зміна вихідної напруги при заданих межах зміни струму навантаження і незмінній вхідній напрузі мережі, що живить. Цей параметр визначає вихідний опір ДВЕЖ при повільній зміні струму.

**Температурна нестабільність**  $\frac{(\Delta U_H)_{t^0}}{U_H}$  - це припустима зміна вихідної напруги при зміні температури навколишнього середовища в заданих межах.

Температурна нестабільність виражається через температурний коефіцієнт напруги стабілізатора при зміні температури навколишнього середовища на  $1^\circ\text{C}$ .

Для підтримки вихідної напруги ДВЕЖ незмінним при впливі дестабілізуючих факторів, застосовуються спеціальні пристрої - **стабілізатори напруги**.

#### 2. ПРИНЦИПИ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ

**Стабілізатор напруги** - функціональний вузол джерела вторинного електроживлення, що здійснює стабілізацію розміру вихідної напруги без зміни роду струму. Під *стабілізацією* параметрів електричної енергії розуміється підтримка значень цих параметрів на заданому рівні з необхідною точністю.

- Стабілізатори напруги можна класифікувати по наступних ознаках: по роду що стабілізується напруги: стабілізатори перемінної напруги;
- стабілізатори постійної напруги;
- по точності підтримки величини що стабілізується :
  - низкою стабільності ( $\partial U_H > 5\%$ );
  - середньої стабільності ( $\partial U_H = 1 \dots 5 \dots 5\%$ );
  - високої стабільності ( $\partial U_H = 0,1 \dots 1 \dots 1\%$ );
  - дуже високої стабільності ( $\partial U_H < 0,1\%$ );
- за принципом дії:
  - параметричні;
  - компенсаційні; безупинної дії; імпульсної дії.

**Параметричний принцип стабілізації** заснований на використанні нелінійного регулюючого елемента, параметр якого змінюється під впливом дестабілізуючого фактора (до таких регулюючих елементів можна віднести, наприклад, кремнієві стабілітрони).

**Компенсаційний принцип стабілізації** заснований на застосуванні замкнутої системи автоматичного регулювання і передбачає порівняння величини що стабілізується із заданою (опорною). Регулюючий елемент стабілізатора змінює свій параметр під впливом різницевого сигналу таким чином, щоб скомпенсувати дію дестабілізуючих факторів (до таких регулюючих елементів можна віднести, наприклад, кремнієві і германієві транзистори).

У основу побудови стабілізаторів напруги покладене використання в силовому колі елементів, що мають нелінійну вольтамперну характеристику (природну або штучну). Такі елементи прийнято поділяти на два типи:  $R_U$  і  $R_I$ . Для нелінійних елементів типу  $R_U$  характерним є незначна зміна напруги на них при значній зміні струму, що протікає через них (мал.2).

Нелінійні елементи типу  $R_I$  відрізняються тим, що електричний струм, що протікає через них, мало залежить від зміни величини прикладеного до них напруги (мал. 3).

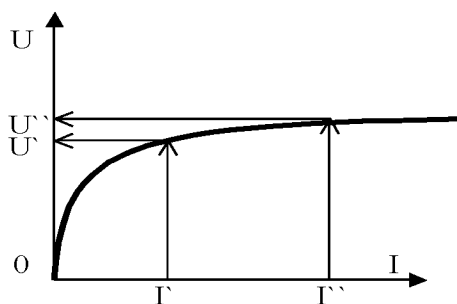


Рис. 2

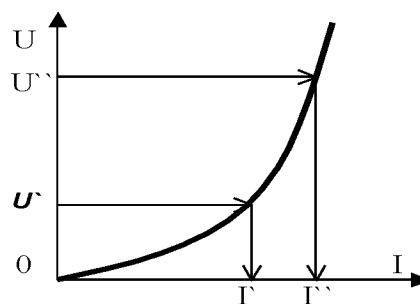


Рис. 3

З порівняння вольтамперних характеристик нелінійних елементів типу  $R_U$  і  $R_I$  видно, що елементи типу  $R_U$  мають стабілізуючі властивості стосовно напруги, а елементи типу  $R_I$  - до сили струму. Саме ці властивості нелінійних елементів визначають спосіб їх вмикання в силове коло стабілізатора напруги: послідовно або паралельно навантаженню (рис. 3, мал. 4).

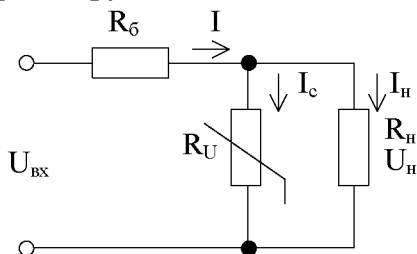


Рис. 3

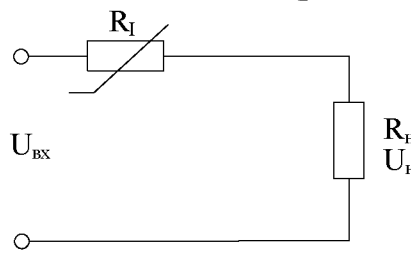


Рис. 4

Елемент типу  $R_U$  включається в ланцюг паралельно навантаженню  $R_H$  (рис.3). При підвищенні вхідної напруги  $U_{вх}$  збільшується струм  $I$  у загальній ділянці ланцюга і складового струму  $I_c$ , що протікає через елемент типу  $R_U$ . При цьому напруга на  $R_U$ , а виходить, і на  $R_H$ , залишиться приблизно незмінним. У якості елементів типу  $R_U$  використовуються нелінійні резистори, газорозрядні і напівпровідникові стабілітрони, напівпровідникові діоди, включені в прямому напрямку (стабістори).

Елемент типу  $R_I$  включається в ланцюг послідовно з навантаженням  $R_H$  (мал.5). При підвищенні вхідної напруги  $U_{вх}$  струм  $I$  у колі залишається практично незмінним (див. мал.3). При цьому напруга на  $R_H$ , рівне  $U_H = I \cdot R_H$ , також практично не змінюється (див. рис. 3). До таких елементів відносяться нелінійні резистори, польові транзистори, включені за схемою двухполосника, у якому джерело з'єднане з затвором.

### 3. ПАРАМЕТРИ СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ

Для оцінки експлуатаційних властивостей стабілізаторів напруги застосовуються різні параметри, основними з яких є:

- вхідне випрямлене напруга  $U_0$ ;
- вихідна напруга стабілізатора  $U_S$  і струм навантаження  $I_H$ ;
- сумарна нестабільність вихідної напруги  $\partial U_S$ ;
- коефіцієнт сгладжування  $K_{сгл}$ ;
- коефіцієнт корисної дії  $\eta$ ;
- коефіцієнт стабілізації  $K_{см}$ ;
- вихідний опір  $R_{ввх}$  і ін.

$\lambda = \frac{U_S}{U_0}$  - коефіцієнт передачі вхідної напруги стабілізатора.

Коефіцієнт корисної дії  $\eta$  дорівнює відношенню потужності, що виділяється на навантаженні, до вхідної потужності:

$$\eta = \frac{P_H}{P_0} = \frac{U_H I_H}{U_0 I_0}.$$

Коефіцієнт стабілізації  $K_{см}$  визначається як відношення відносного збільшення напруги на вході стабілізатора  $\frac{\Delta U_0}{U_0}$  до відносного збільшення напруги на виході  $\frac{\Delta U_S}{U_S}$  при незмінному навантаженні:

$$K_{см} = \frac{\Delta U_0}{U_0} : \frac{\Delta U_S}{U_S} = \lambda \frac{\Delta U_0}{\Delta U_S}, \text{ при } R_H = const.$$

### 4. ПАРАМЕТРИЧНІ СТАБІЛІЗАТОРИ НАПРУГИ

Параметричним називається стабілізатор, виконаний на основі нелінійного елемента типу  $R_U$  або  $R_I$ , що має природну нелінійну вольтамперну характеристику.

Параметричні стабілізатори напруги являють собою найпростішу систему автоматичного регулювання напруги з розімкнутим зворотним зв'язком, у якому реалізований принцип регулювання напруги по збуренню.

Найбільше часто в ДВЕЖ у якості нелінійного елемента використовуються кремнієві стабілітрони. Це напівпровідникові прилади, що мають при зсуві в прямому напрямку

характеристики звичайного діода, а при зсуві в зворотному напрямку відбувається оборотний електричний пробой (рис. 7). При цьому падіння напруги на приладі залишається практично незмінним у діапазоні зміни струму, що протікає через нього, від  $I_{S \min}$  до  $I_{S \max}$ .

Найпростіша схема параметричного стабілізатора (рис. 8) являє собою дільник напруги, що перебуває з резистора  $R_{\delta}$  і кремнієвого стабілітрона  $VD$ .

Відхилення вхідної напруги  $U_0$  приводять до зміни струму через стабілітрон  $I_c$ , при цьому напруга на стабілітроне  $U_S$ , а значить і на навантаженні  $U_H$  змінюється незначно. Розглянемо цей процес.

Вхідна напруга  $U_0$  ділиться між баластовим опором  $R_{\delta}$  і стабілітроном  $VS$ :

$$U_0 = U_{R_{\delta}} + U_S,$$

де

$U_{R_{\delta}} = R_{\delta}(I_c + I_H)$  - падіння напруги на баластовому опорі  $R_{\delta}$ ;

$U_S \approx const$  - падіння напруги на стабілітроне  $VS$  (див. мал.8);

$I_H = \frac{U_S}{R_H}$  - струм навантаження, практично незмінний, тому що  $U_S \approx const$ .

Тому при зміні вхідної напруги в схемі параметричного стабілізатора змінюється в основному

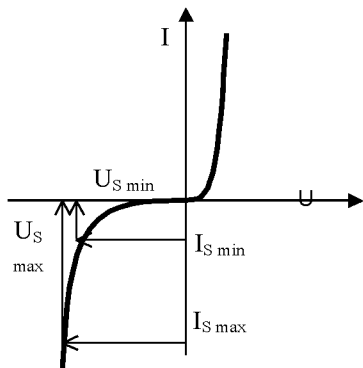


Рис. 8

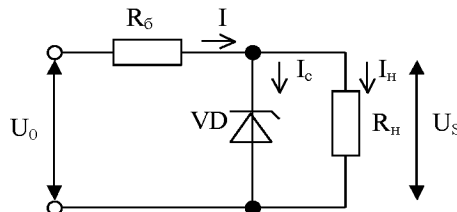


Рис. 9

струм через стабілітрон  $I_c$ . Відповідно до вольтамперної характеристики (рис. 7), напруга на стабілітроне при цьому змінюється в межах  $U_S = U_{S \min} \div U_{S \max}$ , тобто в значно меншому ступені, чим межі зміни струму через стабілітрон  $I_c$ .

При збільшенні струму навантаження  $I_H$  відбувається зменшення струму через стабілітрон  $I_c$ , тому що при незмінній вхідній напрузі  $U_0$  сумарний струм  $I$  залишиться незмінним.

#### Параметри стабілізатора

**Вихідний опір:**  $R_{\text{вих}} = \frac{\Delta U_S}{\Delta I_S} = \frac{U_{S \max} - U_{S \min}}{I_{S \max} - I_{S \min}}$  (див. мал.8).

**Коефіцієнт стабілізації:**

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_0}{U_0} : \frac{\Delta U_S}{U_S} = \frac{\Delta I_c R_{\delta}}{U_0} : \frac{\Delta I_c R_{\text{вих}}}{U_S} = \frac{U_S}{U_0} \cdot \frac{R_{\delta}}{R_{\text{вих}}} = \lambda \cdot \frac{R_{\delta}}{R_{\text{вих}}}.$$

Таким чином, коефіцієнт стабілізації збільшується при збільшенні  $R_{\delta}$ . Однак, при заданих  $U_0$ ,  $U_S$ ,  $I_H$ ,  $I_c$  величину баластового опору  $R_{\delta}$  однозначно визначається співвідношенням:

$$R_{\delta} = \frac{U_0 - U_S}{I_{c \text{ ср}} + I_H}.$$

Збільшення  $R_{\delta}$  можливо лише при збільшенні  $U_0$ , але при цьому зменшується величину  $K_{cm}$ .

Тому коефіцієнт стабілізації найпростіших параметричних стабілізаторів не перевищує 50.

Для підвищення  $K_{cm}$  застосовують:

- багатокаскадні схеми параметричних стабілізаторів;
- вмикання замість лінійного баластового опору  $R_{\delta}$  стабілізатора струму (нелінійний елемент типу  $R_I$ ) і ін.

#### Переваги:

- простота;
- надійність.

#### Недоліки:

- неможливість регулювання вихідної напруги;
- мале значення коефіцієнта стабілізації, особливо при великих струмах навантаження.

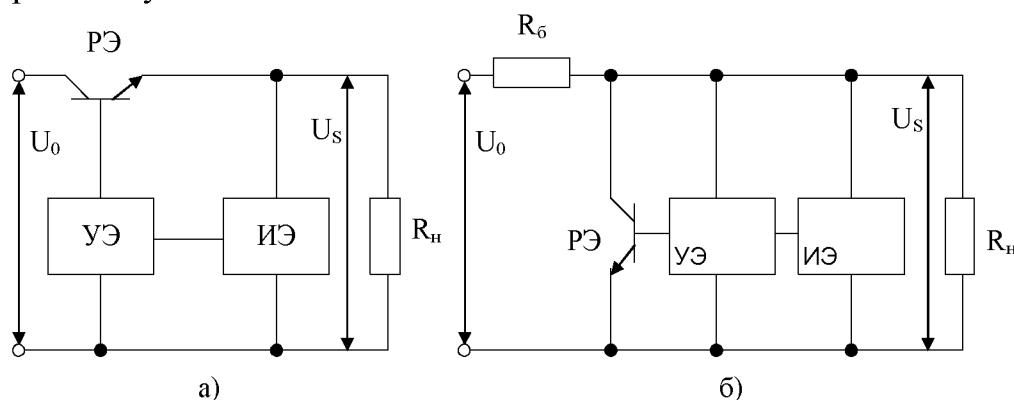
### 5. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ КОМПЕНСАЦІЙНИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ

Відповідно до компенсаційного принципу стабілізації, до складу компенсаційних стабілізаторів напруги входять наступні функціональні елементи:

- вимірвальний елемент ВЕ, у якому відбувається порівняння поточного значення вихідної напруги  $U_S$  стабілізатора з еталонним (опорним) напругою  $U_{on}$  і виробляється сигнал неузгодженості між ними;
- підсилювальний елемент ПЕ, у якому відбувається посилення сигналу неузгодженості і, при необхідності, перетворення його в імпульсний сигнал керування;
- регулюючий елемент РЕ, що змінює свої параметри відповідно до сигналу керування таким чином, щоб вихідна напруга  $U_S$  стабілізатора підтримувалося на заданому рівні з необхідною точністю.

#### Класифікація стабілізаторів напруги

- по способу вмикання регулюючого елемента щодо навантаження:
  - послідовне вмикання регулюючого елемента;
  - паралельне вмикання регулюючого елемента;
- по режиму роботи регулюючого елемента:
  - безупинні;
  - імпульсні;
  - безперервно-імпульсні.



#### Структурні схеми стабілізаторів напруги

Структурні схеми стабілізаторів із послідовним і паралельним вмиканням регулюючого елемента приведені на рисунку.

З структури побудови стабілізаторів видно, що в послідовному стабілізаторі регулюючий елемент РЕ під впливом сигналу керування формує вольтамперну характеристику типу  $R_I$ , а в паралельному стабілізаторі - вольтамперну характеристику типу  $R_U$ .

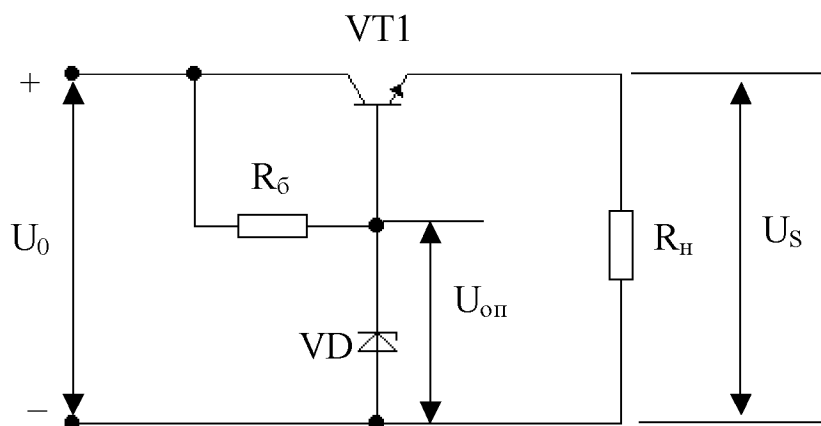
*Стабілізатори з послідовним вмиканням регулюючого елемента* володіють відносно високим ККД тільки при невеликих потужностях навантаження в зв'язку з тим, що вся потужність

навантаження передається через регулюючий елемент РЕ, на якому розсіюється значна потужність.

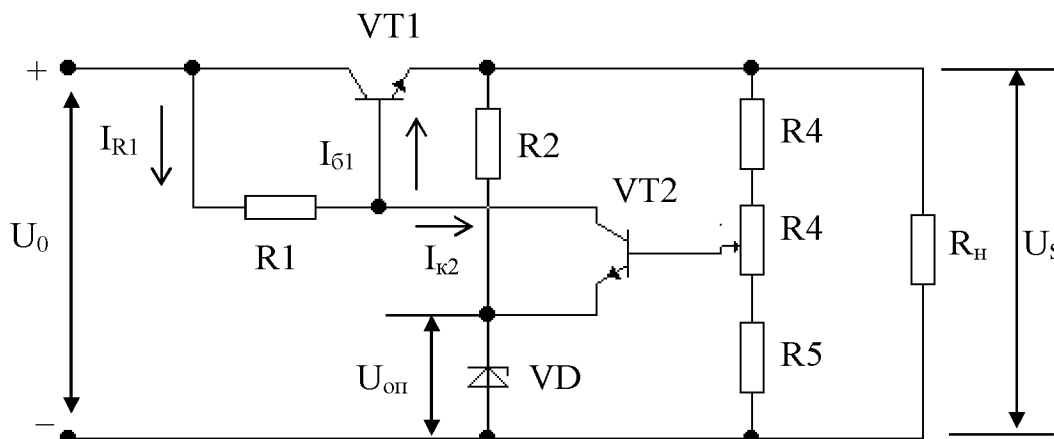
*Стабілізатори з паралельним вмиканням регулюючого елемента* більш ефективні при великих потужностях навантаження, тому що основна частина потужності передається в навантаження, минаючи регулюючий елемент РЕ. Такі стабілізатори широко застосовуються при низьких вихідних напругах і великих струмах навантаження і, на відміну від стабілізаторів із послідовним вмиканням регулюючого елемента, не критичні до перевантажень по струму і коротких замиканнях на виході стабілізатора.

## 6. БЕЗУПИННІ КОМПЕНСАЦІЙНІ СТАБІЛІЗАТОРИ НАПРУГИ

Розглянемо найпростіший безупинний компенсаційний стабілізатор напруги з послідовним вмиканням регулюючого елемента .



Такий стабілізатор перебуває з двох частин: параметричного стабілізатора  $R_6$ ,  $VD1$ , що



створює опорна напругу  $U_{оп}$ , і регулюючого транзистора  $VT1$ , що сполучає в собі функції регулюючого елемента РЕ (перехід колектор–емітер), вимірювального і підсилювального елемента (перехід база–емітер).

При нормальному режимі, коли відсутня дестабілізація, режим роботи регулюючого транзистора  $VT1$  вибирається таким чином, щоб він був цілком відкритий напругою зсуву емітер–база, що звичайно складає величину порядку

0,3 В. Вихідна напруга при цьому приблизно дорівнює  $U_{оп}$ . Якщо за якимись причинами вхідна напруга змінюється, відповідно змінюється і напругу зсуву емітер–база, що приводить до зміни опору переходу емітер–колектор регулюючого транзистора таким чином, щоб вихідна напруга залишилася незмінним.

Для підвищення чутливості стабілізатора до змін вхідної напруги використовують більш складну схему (рис 11).

До складу стабілізатора входять:

- Регулюючий елемент - транзистор  $VT1$ ;
- вимірювальний елемент - нелінійний вимірювальний міст на резисторах  $R2 \div R5$ , стабілітроні  $VD$ ;
- підсилюючий елемент - підсилювач постійного струму на транзисторі  $VT2$ , резисторе  $R1$ .

На відміну від попередньої схеми, у даній схемі режим роботи регулюючого транзистора  $VT1$  визначається не тільки зміною напруги на його емітері, але і зміною напруги на його базі.

При збільшенні величини вхідної живлячої напруги  $U_0$  в перший момент збільшується напруга  $U_{к1}$  колектора регулюючого транзистора  $VT1$ , вихідна напруга стабілізатора  $U_S$ , що приводить до збільшення напруги неузгодженості нелінійного моста. Транзистор  $VT2$  відкривається, що приводить до зменшення напруги  $U_{б1}$  на базі транзистора  $VT1$ :  

$$U_{б1} = U_{он} + U_{кэ2}.$$

При цьому збільшується струм  $I_{к2}$  колектора транзистора  $VT2$  і зменшується струм  $I_{б1}$  бази, а значить і колектора  $I_{к1}$  регулюючого транзистора  $VT1$ . Транзистор призакривається.

Аналогічним способом працює схема і при впливі інших дестабілізуючих факторів.

Потенциометр  $R4$  забезпечує плавне регулювання вихідної напруги стабілізатора в необхідних межах.

Безупинні стабілізатори постійної напруги мають наступні **переваги**, що визначили їхнє широке застосування:

- висока точність стабілізації вихідної напруги;
- спроможність згладжувати пульсації випрямленої напруги;
- малий динамічний внутрішній опір;
- відсутність електромагнітних перешкод у процесі роботи; великий діапазон динамічної зміни струму навантаження (0,8 - 0,9).

Недоліками таких стабілізаторів є:

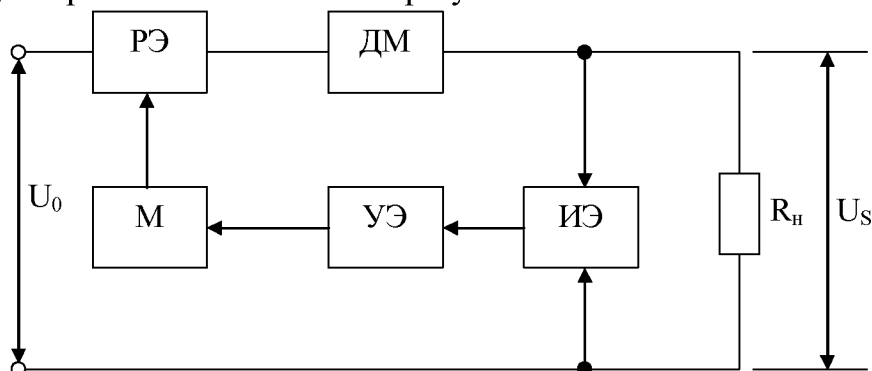
- порівняно низький ККД (0,5 - 0,7), обумовлений великою потужністю, що розсіюється в регулюючому транзисторі;
- невисокі питомі характеристики через необхідність застосовувати габаритні і масивні радіатори охолодження регулюючих транзисторів.

## 7. ІМПУЛЬСНІ КОМПЕНСАЦІЙНІ СТАБІЛІЗАТОРИ НАПРУГИ

Імпульсні компенсаційні стабілізатори напруги відрізняються від безупинних тем, що регулюючий елемент працює в *ключовому режимі*.

Структурна схема відрізняється наявністю пристрою, що перетворює безупинний сигнал неузгодженості в імпульсний сигнал керування регулюючим елементом (**модулятор**) і пристрої, що здійснює перетворення імпульсної вихідної напруги стабілізатора в постійну напругу (**демодулятор**).

Аналогічно безупинним, імпульсні стабілізатори напруги можуть виконуватися за схемою з послідовним (мал. 13) і паралельним вмиканням регулюючого елемента РЭ.



Під впливом сигналів керування, елемент РЕ, що регулює відчиняється на визначений час, у результаті чого в схемі після РЕ має місце послідовність прямокутних імпульсів з амплітудою  $U_0$ . При зміні вхідної напруги  $U_0$ , змінюється або тривалість відкритого стана РЕ при незмінній частоті проходження імпульсів (широтно-імпульсна модуляція - ШІМ), або частота проходження імпульсів при їхній незмінній тривалості (частотно-імпульсна модуляція - ЧІМ).

**Переваги:**

- більш високий ККД (через зниження втрат на регулюючому елементі);
- більш висока потужність;
- більш високі питомі характеристики.

**Недоліки:**

- підвищена складність схеми;
- малий діапазон динамічної зміни струму навантаження  $I_H$ ;
- стабілізатор є джерелом імпульсних електромагнітних перешкод.

**Завдання на самостійну роботу:**

**Повторити:**

1. Принципи стабілізації напруги
2. Схеми стабілізаторів та їх принцип дії
3. Визначення коефіцієнту стабілізації