

ISBN 978-83-66216-82-2

Касаткіна І.В., Бойко С.М., Вишневський С.Я.

ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ, НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

 **iScience**

Варшава, Польща - 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Касаткіна І.В., Бойко С.М., Вишневецький С.Я.

**ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ,
НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ
ЕНЕРГІЇ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ
ЕНЕРГОРЕСУРСИ ДЛЯ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Навчальний посібник

Варшава-2023

УДК 621.31

Рекомендовано до друку вченою радою Криворізького національного університету 30 травня 2023р. (протокол № 12)

Рецензенти:

Котов О.Б., доктор технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка» (м. Запоріжжя),

Саблін О.М., доктор технічних наук, професор, Українська державна університет науки і технологій (м. Дніпро)

І.В. Касаткіна, С.М. Бойко, С.Я. Вишневський

Т 38 Джерела живлення, накопичення електричної енергії та альтернативні енергоресурси для транспортних засобів. Навчальний посібник / І.В. Касаткіна, С.М. Бойко, С.Я. Вишневський – Варшава: iScience Sp. z o.o. – 2023. – 140 с.

У навчальному посібнику викладено основні питання щодо джерел живлення, накопичення електричної енергії та альтернативних енергоресурсів для транспортних засобів.

Навчальний посібник є логічним продовженням ряду навчальних посібників авторів та містить їх нові наукові розробки.

Рекомендовано для фахівців, аспірантів та студентів за напрямком 141 – «Енергетика, електротехніка та електромеханіка», 275 – «Транспортні технології» та інших споріднених спеціальностей при вивченні дисциплін «Джерела живлення», «Накопичення електричної енергії», «Альтернативні енергоресурси для транспортних засобів» та інших.

ISBN 978-83-66216-82-2

© І.В. Касаткіна, С.М. Бойко,
С.Я. Вишневський 2023

© iScience Sp. z o. o.

ЗМІСТ:

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	6
1.1 Сучасні джерела живлення та накопичення електричної енергії для транспортних засобів	6
1.2 Джерела електричної енергії міського електричного транспорту.....	31
1.3 Джерела електричної енергії міського автомобільного транспорту.....	38
1.4 Акумуляторна тяга рухомого складу залізничного транспорту.....	40
1.5 Перспективи електрифікації авіаційного транспорту.....	45
1.6 Сучасні підходи до електрифікації промислового транспорту.....	47
Контрольні питання до розділу 1	66
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО НАКОПИЧУВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	67
2.1 Поняття та класифікація систем накопичення електричної енергії для транспортних засобів	67
2.2 Історичні передумови використання акумуляторних батарей	75
Контрольні питання до розділу 2	79
РОЗДІЛ 3. СВИНЦЕВО-КИСЛОТНІ АКУМУЛЯТОРНІ БАТАРЕЇ	80
3.1 Особливості конструкції свинцево-кислотних акумуляторних батарей	80
3.2 Заряд свинцево-кислотних акумуляторних батарей	84
3.3 Особливості експлуатації свинцево-кислотних акумуляторних батарей	87
Контрольні питання до розділу 3	88
РОЗДІЛ 4. НІКЕЛЬ-КАДМІНІЄВІ АКУМУЛЯТОРНІ БАТАРЕЇ	89
4.1 Конструкція нікель-кадмієвих акумуляторних батарей ..	89
4.2 Особливості заряду нікель-кадмієвих акумуляторних батарей	90
4.3 Експлуатаційні характеристики нікель-кадмієвих акумуляторних батарей	92
Контрольні питання до розділу 4	93

РОЗДІЛ 5. ЛІТІЙ-ІОННІ АКУМУЛЯТОРНІ БАТАРЕЇ.....	94
5.1 Особливості побудови літій-іонних акумуляторних батарей	94
5.2 Заряд літій-іонних акумуляторних батарей	99
5.3 Пристрої захисту літій-іонних акумуляторних батарей під час експлуатації.....	101
Контрольні питання до розділу 5.....	102
РОЗДІЛ 6. ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ	103
6.1 Принципи побудови зарядних пристроїв.....	103
6.2 Зарядні пристрої свинцево-кислотних акумуляторних батарей	106
6.3 Зарядні пристрої нікель-кадмієві акумуляторних батарей	107
6.4 Зарядні пристрої літій-іонних акумуляторних батарей	111
Контрольні питання до розділу 6.....	114
РОЗДІЛ 7. АЛЬТЕРНАТИВНІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....	115
7.1 Воднева енергетика та перспективи її розвитку	115
7.2 Сучасні способи отримання водню в умовах транспортної інфраструктури	119
Контрольні питання до розділу 7.....	133
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ДЛЯ КОРИСТУВАННЯ ЛІТЕРАТУРИ	134

ВСТУП

На сьогоднішній день, економіки провідних країн світу стрімко розвиваються, не зважаючи на глобальні економічні, техногенні та політичні проблеми суспільства. Основними факторами такого стрімкого розвитку провідних економік світу є розвинена енергетична та транспортна галузі, що представляють собою основу розвинених економік світу.

Зважаючи на світову тенденцію до декарбонізації та «зеленої енергетики», враховуючи струмкий попит розвинених країн світу на енергоресурси на ряду з енергозбереженням та енергоефективним споживанням енергоресурсів, актуальним залишається питання пошуку нових видів енергетичних ресурсів та їх впровадження в системи електропостачання промислових та побутових об'єктів.

Останнім часом питання впровадження «зелених» технологій стало актуальним і в транспортній галузі. Вирішується це питання не лише впровадженням сучасних технологій щодо зменшення шкідливих викидів вихлопних газів в атмосферу, а й електрифікацію транспортних засобів всіх типів.

Між тим, уповільнений розвиток сучасних «зелених» технологій на транспорті зумовлений відсутністю відповідної розвинутої інфраструктури, та малою кількістю сервісних центрів з обслуговування транспортних засобів, що живляться від альтернативних видів палива.

Тож, актуальною залишається проблематика «зелених» технологій в енергетиці та транспорті як на світовому, так і державному та регіональному рівнях.

РОЗДІЛ 1 ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

1.1 Сучасні джерела живлення та накопичення електричної енергії для транспортних засобів

Енергетичні ресурси (джерела енергії) — це матеріальні об'єкти, в яких зосереджена енергія, придатна для практичного використання людиною.

Види енергії можна виділяти на основі різних класифікаційних критеріїв. Важливим є розподіл енергії на первинну і вторинну. До первинної відноситься енергія, яка безпосередньо існує в природі, а до вторинної – енергія, що отримується людиною після перетворення первинного джерела енергії на спеціальних установках [1].

Одним із найпоширеніших критеріїв класифікації енергетичних ресурсів є їх відновлюваність, тобто можливість чи здатність збільшення кількості ресурсу або ж поновлення обсягів використаних ресурсів унаслідок природних процесів чи цілеспрямованої діяльності людини. Відповідно до цього критерію, як правило, енергетичні ресурси поділяють на відновлювані та невідновлювані.

Види енергоресурсів поділяють на первинні та вторинні.

Первинні енергоресурси — це природні ресурси, які не переробляють і не перетворювали: сира нафта, природний газ, вугілля, горючі сланці, вода річок і морів, гейзери, вітер тощо.

У свою чергу, первинні ресурси (або види енергії) поділяють на поновлювані і непоновлювані. Непоновлювані джерела енергії — це природно утворені й накопичені в надрах планети запаси речовин, здатних за певних умов звільняти енергію, що міститься в них. Такими є викопне органічне паливо (вугілля, нафта, природний газ, торф, горючі сланці), ядерне паливо. Поновлювані джерела енергії — ті, відновлення яких постійно здійснюється в природі (сонячне випромінювання, біомаса, вітер, вода річок та океанів, гейзери тощо), і які існують на основі постійних чи періодично виникаючих в природі потоків енергії, наприклад: сонячне випромінювання (біомаса, енергія сонця, вітру, хвиль); гравітаційна взаємодія Сонця, Місяця і Землі (наслідком якої є, наприклад, морські припливи та відпливи); теплова енергія ядра Землі, а також хімічних реакцій і радіоактивного розпаду в її надрах (геотермальна енергія джерел гарячої води — гейзерів). Крім природних джерел поновлюваних енергоресурсів, сьогодні дедалі

більшого значення набувають антропогенні, до яких належать теплові, органічні та інші відходи діяльності людства [2].

Різні види енергетичних ресурсів мають різну якість, для палива її характеризує теплотворна спроможність, тобто скільки енергії (тепла) може виділити це джерело.

Україна не залишилась на узбіччі сучасних процесів в енергетиці. Наразі, в нашій країні також з кожним роком набирає обертів процес використання альтернативних видів енергії. І хоча процес розвитку відновлювальних джерел енергії відбувається достатньо повільно, не все в цьому питанні безнадійно.

Джерела живлення характеризуються значенням електрорушійної сили і внутрішнього опору.

До джерел живлення належать гальванічні елементи, електрохімічні батареї, акумулятори, термопари, сонячні батареї, електричні генератори тощо.

Залежно від виду електрорушійної сили джерела живлення поділяють на джерела живлення постійного струму і джерела живлення змінного струму.

Розрізняють первинні джерела живлення, які безпосередньо перетворюють інші види енергії в електричну і вторинні джерела живлення, які виконують роль проміжних перетворювачів електричної енергії, такі як блоки живлення електронних приладів, трансформатори тощо.

В світових енергетичних системах все більшого значення набувають системи накопичення і зберігання енергії. На сьогодні їх сукупна потужність у світі досягла майже 170 ГВт. Найбільші потужності зосереджені в Китаї (19% від світових), Японії (17%), США (14%) і країнах Європи (Іспанія, Італія, Німеччина та інших). За прогнозами до 2030 року потужність накопичувачів енергії може зрости в три рази. Основними причинами цього є поширення відновлюваних джерел енергії та поява нових вимог до електроенергетичних систем [3].

Абсолютне лідерство в структурі накопичувачів займають гідроакумулюючі електростанції, частка яких в сукупній потужності світових систем зберігання енергії становить 96%, але роль інших видів накопичувачів енергії досить швидко зростає. Динамічний розвиток технологій накопичення електроенергії може помітно змінити енергосистеми. Це певною мірою знизить попит на викопні палива, оскільки накопичувачі все більше замінюватимуть теплову генерацію в ролі балансувальника електроенергетичних систем. Накопичувачі енергії стануть таким же елементом енергосистеми, як генерація,

передача, розподіл і збут, які забезпечують вартісну ефективну гнучкість їх функціонування.

Основний ефект від застосування накопичувачів в мережах полягає в забезпеченні безперебійного електропостачання груп споживачів, які вимагають за своїми технологічними процесами і соціальним значенням в житті суспільства підвищеного рівня надійності, зниження втрат електроенергії і потужності в електричних мережах, скорочення інвестицій в будівництво генеруючих і електромережних об'єктів, розвантаження мереж від реактивної потужності і підвищення їх пропускної здатності, стабілізації напруги в вузлах мережі, часткової нейтралізації наслідків розвитку системних аварій [4].

Залежно від конкретних умов і цілей зберігання енергії вибір типу накопичувачів може залежати від вимог до видаваної потужності, тривалості зберігання енергії, питомих витрат, коефіцієнту корисної дії, терміну служби і кількості циклів заряду, території розміщення і впливу на навколишнє середовище. За принципом роботи накопичувачі енергії бувають: механічні кінетичні (маховикові), гідроакумуючі станції, на енергії стисненого повітря, хімічні (перетворення електроенергії в газ, водень, водню в аміак), електрохімічні (акумуляторні батареї літій-іонні, нікель-кадмієві і таке інше), теплові (накопичення гарячої води, накопичення прихованої теплової енергії), електричні (суперконденсатори). Накопичувачі в мережі можуть працювати в таких режимах роботи з їх комбінаціями: – черговий режим в якому накопичувач не споживає з мережі і не віддає електроенергію в мережу, за винятком споживання для власних потреб; – режим накопичення енергії, коли відсутня необхідність віддачі енергії мережевий накопичувач переходить в режим накопичення енергії.

Види акумуляції енергії [5]:

- Зберігання вичерпаного палива
- Механічне
- Пневматичний акумулятор
- Безтопковий паровоз
- Супермаховик
- Гравітаційна потенціальна енергія
- Гідроаккумулятор
- Гідроаккумуляційна електростанція
- Електричний, електромагнітний
- Конденсатор
- Суперконденсатор

- Надпровідниковий магнітний акумулятор (надпровідникові магніти і надпровідні котушки (H01F6))
- Біологічний
- Глікоген
- Крохмаль
- Електрохімічний
- Проточний акумулятор
- Акумуляторна батарея
- UltraBattery[en]
- Тепловий
- Акумулятор тепла
- Криогенні системи зберігання, акумулювання енергії зрідженим повітрям (LAES)
- Криогенний двигун Дермана
- Евтектична система
- Акумулятор холоду
- Фазовий перехід речовини
- Сезонне зберігання теплової енергії
- Сонячний ставок
- Паровий акумулятор
- Зберігання теплової енергії (Загальна)
- Хімічний
- Біопаливо
- Гідратовані солі
- Зберігання водню
- Перекис водню
- Технологія Power-to-Gas (P2G)
- Оксид ванадію(V)

Висока вартість систем накопичення енергії може компенсуватися такими перевагами [6]:

- забезпечення інтеграції відновлюваних джерел енергії в енергосистему;
- оптимізації поточкорозподілу в електричних мережах для скорочення обсягів будівництва додаткових елементів в енергосистемі;
- отримання додаткових швидкодіючих засобів регулювання режиму, що постачаються на ринок системних послуг;
- підвищення надійності електропостачання споживачів;
- іншими перевагами технічного або економічного характеру.

При порівнянні різних технологій накопичення енергії з погляду їх практичного застосування в електроенергетиці

використовують різні характеристики накопичувачів, що визначаються їх фізичними властивостями. До таких характеристик належать [8]:

- встановлена потужність – визначається величиною потужності, яку може віддати в ЕЕС система накопичення енергії;

- енергоємність – енергія, яку система накопичення енергії може запасти і видати в ЕЕС;

- тривалість відгуку (пуску) – час переходу системи накопичення енергії з неробочого стану (холостого ходу, режиму зарядки) у стан видачі енергії із заявленими параметрами;

- тривалість розряду – час, протягом якого потужність і енергія постачаються в ЕЕС без підзарядки.

Щільність потужності і енергії визначаються величинами потужності і енергії, що припадають на одиницю ваги накопичувача. Ця характеристика має значення при транспортуванні накопичувачів або в разі пересувних систем накопичення енергії.

Ефективне використання світових енергетичних ресурсів залежить не тільки від способів їх використання, а й від методів зберігання виробленої енергії. За прогнозами аналітиків GMT Research обсяг ринку зберігання енергії активно розвивається і вже в 2020 році в 26 разів перевищить показник 2014 року. У 2015 році приблизно 16% від загального обсягу ринку припало на домашні системи зберігання енергії. Це обумовлено тим, що при розміщенні сонячної або вітряної електростанції бажано встановлювати також і систему зберігання енергії, оскільки електроенергія з відновлюваних джерел енергії виробляється нерівномірно протягом дня. Наприклад, сонячна енергія виробляється тільки вдень, але використовуватися вона повинна протягом усього дня. Або видався похмурий день і генерація склала істотно менше, ніж щоденне споживання вашого домогосподарства. Саме для таких випадків і призначені системи зберігання енергії [9].

Технології зберігання енергії

Сьогодні на ринку систем зберігання енергії найбільш поширена літій-іонна технологія. Наприклад, в 2015 році в 95% випадків застосовувалися літій-іонні акумулятори. Вони також широко використовуються на споживчому ринку і на ринку автомобілів, де встановлюються в гібридних або повністю електричних транспортних засобах. Ціни на літій-іонні батареї знижуються, їх безпека підвищується, вони добре себе показують як у системах, де потрібна велика кількість енергії протягом короткого періоду (силові установки), так і в системах, які вимагають меншу кількість енергії протягом більш тривалого періоду. Таким чином літій-іонні акумулятори підходять для

зберігання енергії будь-яким споживачем – від великих комунальних підприємств, що займаються передачею і розподілом енергії до індивідуальних комерційних і житлових об'єктів [10].

Однак корисність літій-іонної технології необхідно додатково обумовлювати. По-перше, дуже важливо, щоб експлуатаційні характеристики різних типів літій-іонних батарей відповідали поставленим завданням. Наприклад: для великих електростанцій одна модель акумулятора може бути на 80% ефективніше, ніж інша, через здатність АКБ швидко заряджатися і розряджатися. По-друге, в деяких окремих випадках інші технології можуть працювати краще. Зокрема: для управління системою заряду і зберігання енергії в житлових системах свинцево-кислотні батареї можуть виявитися більш ефективними. А для великомасштабних електростанцій лужні батареї є більш економічними, але тільки для коротких періодів заряджання та розряджання (швидше однієї години).

Основні характеристики систем зберігання енергії

Однією з головних характеристик для будь-яких систем зберігання енергії є корисна ємність. Цей параметр системи накопичення енергії залежить від номінальної потужності, допустимої глибини розряду і зменшення ємності акумулятора з плином часу. Наприклад, Adara Power пропонує систему зберігання енергії для домогосподарств номінальною потужністю акумулятора 8,6 кВт·год. При цьому, заявлена максимально допустима глибина розряду для цієї системи складає 75%. Отже, корисна ємність акумуляторів Adara становить 6,45 кВт·год. У той же час прями конкурент – Tesla – випускає системи зберігання енергії Powerwall, які мають допустиму глибину розряду в 100%. Для них корисна ємність буде дорівнювати номінальній (7 або 10 кВт·год).

Проте, номінальна ємність акумулятора заявлена тільки на перший день їх роботи. З плином часу корисна ємність буде повільно зменшуватися через зношування. Кількість циклів, на яку розрахована система, це характеристика довговічності акумулятора. Термін служби батареї сильно залежить від характеру використання. Наприклад, виробник може оцінити термін життя однієї і тієї ж батареї в 4000 циклів при глибині розряду в 70% або в 3000 циклів при глибині розряду 85%. Клієнти повинні мати доступ до таких даних, однак на практиці ці дані практично неможливо знайти [11].

Знати кількість циклів при різних умовах використання важливо з точки зору максимізації віддачі акумулятора для клієнта. Наприклад, Sonnen дає гарантію на всі свої системи зберігання енергії

SonnenBatterie у вигляді «10 000 циклів або 10 років». При використанні такої системи в звичайному режимі ви отримуєте лише близько 3650 циклів за 10 років. Таким чином, щоб наблизитися до 10 000 циклів протягом гарантійного терміну ви повинні здійснювати близько 3 циклів в день, для чого будуть потрібні спеціальні умови. Прикладом може послужити використання системи не тільки для власного споживання, а і для продажу електроенергії в мережу.

Бізнес-моделі для систем зберігання енергії

Існує кілька економічних сценаріїв для власників систем зберігання енергії:

– **Автономна домашня електростанція.** В цьому випадку ви використовуєте вашу систему зберігання енергії, щоб зберігати вироблену енергію для своїх потреб і зробити ваш будинок енергонезалежним. Надлишок енергії, що генерується протягом дня, зберігається в системі акумуляторів для споживання в нічний час. Однак для таких систем необхідний додатковий контроль кількості виробленої енергії, також бажано мати резервне джерело живлення. По суті, така система зберігання енергії повинна розраховувати споживання енергії домогосподарством в режимі реального часу для оптимізації виробництва електроенергії. Крім того, система повинна скорочувати генерацію, коли кількість виробленої енергії перевищує обсяг системи зберігання. Такий варіант розміщення є вигідним при бажанні клієнта стати повністю незалежним або в регіонах з високою вартістю електроенергії.

– **Резервна домашня електростанція.** Цей варіант енергосистеми буде цікавий для домогосподарств, розташованих в регіонах, що мають проблеми з поставками енергії. Електростанція виробляє електрику тільки до повного заповнення системи зберігання, після чого вимикається. В результаті на момент відключення живлення ви маєте завжди повністю заряджену систему акумуляторів, а також можете при необхідності виробляти електроенергію самостійно. В такому випадку вам необхідно розрахувати кількість енергії, необхідну для забезпечення будинку в періоди відключення електрики і встановити відповідні розміри системи зберігання енергії.

– **Мережева домашня електростанція.** В такому випадку ви переслідуйте мету продавати вироблювану енергію вище ціни, по якій ви купуєте її у держави. В умовах України таке рішення є досить вигідним, оскільки держава зобов'язана викупляти у вас електроенергію за «зеленим» тарифом, який прив'язаний до вартості євро. Щоб продавати енергію напряму, вам не знадобиться

встановлювати систему зберігання енергії, що дозволяє значно заощадити [12].

Феномен від'ємних цін на електроенергію

Від'ємні ціни на електроенергію є відносно новим явищем на оптових ринках електроенергії. Вперше вони були помічені на німецькому денному ринку в 2007 році і в даний час досить рідкісні, але в 2012 році при формуванні цін на наступний день були 56 годин в 15 різних днів, коли ціни опускалися до негативних значень. Це означає, що постачальники електроенергії повинні були платити споживачам, щоб останні використовували постачаючу їм енергію. Таке явище виникає, коли подачі електроенергії відповідає виключно низький попит і постачальник вирішує, що витрати, пов'язані із завершенням роботи і перезапуском всієї системи живлення, більше, ніж витрати, пов'язані з виплатою зовнішній стороні для використання виробленої електроенергії. Від'ємні ціни на електроенергію вказують на негнучкість існуючого режиму і їх поява відображає необхідність в системах зберігання енергії. Їх присутність повинна стимулювати ринок зберігання енергії: замість того, щоб купувати енергію і потім продавати її, володар системи зберігання енергії може «купити» енергію (за яку йому заплатить постачальник) і потім продати її пізніше, отримуючи, таким чином, подвійну вигоду. При цьому факт установки систем зберігання енергії буде штовхати ціни вгору і досить великий ринок зберігання енергії сам по собі призведе до зникнення від'ємних цін на електроенергію.

Системи накопичення енергії: побутові та промислові зразки, існуючі і перспективні розробки

Нижче ми пропонуємо огляд світового ринку систем накопичення електроенергії, ми відібрали найбільш передові компанії і технології, щоб представити варіативність можливих рішень і різноманітність наявної технічної бази. При цьому, під час оцінки не враховувались, можливо, прекрасні і навіть революційні ідеї, які зараз або просто неможливо реалізувати з технічних причин, або їх використання не приносить позитивного економічного ефекту. Тут представлені компанії, які вже зараз мають великі можливості і можуть представити готові інноваційні рішення, а їх надійність і перспективність підтверджена «послужним» списками – вже реалізованими проектами [13].

Технологія Powerwall and Powerpack

Tesla поступово стає одним зі світових лідерів в області створення систем зберігання енергії. На сьогоднішній день Tesla

просуває на ринку два різновиди таких систем: Powerwall та Powerpack. Перша може використовуватися в житлових і невеликих офісних приміщеннях, друга – для роботи на підприємствах, вона здатна працювати з великими потужностями і для великої кількості споживачів.

«Домашня» Powerwall має кілька різновидів – 7 кВт (вартість 3 тис. доларів), 10 кВт (вартість 3,5 тис. доларів) і 14 кВт (вартість 5,5 тис. доларів, ємності такого акумулятора вистачить на добу для енергозабезпечення будинку з двома спальнями). Окремо доведеться сплатити близько 1500 – 1600 доларів за установку, інвертори та інші витратні матеріали. Габаритні розміри становлять близько метра в ширину і довжину, товщина – близько 18 см, вага – 100 кг. Підзарядка акумулятора можлива як від вітрогенератора або сонячної батареї, так і від побутової мережі. Powerwall може бути встановлена всередині або зовні будинку, допустима температура експлуатації – від -20 до +43 градусів. Гарантія від виробника – 10 років.

Потужність промислової Powerpack становить 100 кВт, але її конструкція дозволяє легко об'єднувати окремі елементи в великі системи потужністю до 100 МВт, що вистачить для енергозабезпечення великого промислового об'єкта. Приблизна вартість складе 250 доларів за 1 кВт.

Технологія ZCell

Коли австралійська компанія Redflow заявила про початок продажів домашніх потужних акумуляторних батарей з рідким електролітом, багато фахівців не сприйняли цю інформацію серйозно. Втім, перші зразки, що надійшли в продаж в березні 2016 року отримали позитивні відгуки. Поки компанія Redflow орієнтується на внутрішній австралійський ринок користувачів сонячної енергії.

Постійне зниження «зеленого» тарифу на тлі зростаючих цін на енергоносії роблять батареї з рідким електролітом ZCell все більш привабливими для домашнього господарства. Розроблена австралійськими інженерами система збереження енергії заснована на цинк-бромній акумуляторній батареї ємністю 10 кВт. Накопичуючи енергію від сонячних батарей, вона віддає її в моменти пікового навантаження, а так само у вечірньо-нічний час. Серед переваг можна відзначити [14]:

- максимально допустима глибина розряду становить 100%, при цьому розробники стверджують, що повний розряд ніяк не позначається на ємності батареї і її експлуатаційних характеристиках;
- батарея може перебувати розрядженою дуже тривалий час, це

ніяк не позначиться на її характеристиках;

- ємність батареї практично не змінюється з часом – гарантія на акумулятор 10 років;

- в батарею вбудована власна система електрозахисту, крім того, існуючий інтерфейс дозволяє контролювати і управляти роботою системи дистанційно, використовуючи Інтернет;

- простота встановлення – система поставляється у вигляді моноблока, який просто необхідно поставити всередині або зовні будинку і підключити до мережі;

- екологічна безпека – все елементи акумулятора підлягають вторинній переробці;

- за своїми габаритами – це найменша масово випускається батарея з рідким електролітом.

Основні проблеми, на думку фахівців, пов'язані саме з цинк-бромним акумулятором, який дуже ефективний при тривалих циклах накопичення і зберігання енергії, але при цьому не дуже виправданий при коротких циклах заряд-розряд. Крім того, більшість користувачів звикли орієнтуватися на літій-іонні акумулятори, що робить подальшу комерціалізацію ZCell досить проблематичною, особливо за межами Австралії [15].

Технологія SonnenCommunity

Компанія Sonnen – безсумнівний лідер німецького ринку побутових систем зберігання енергії, на сьогоднішній день компанія реалізувала більше 10 тисяч домашніх систем. Sonnen представляє акумуляторні батареї ємністю від 2 до 16 кВт·год, термін служби – не менше 10 тисяч циклів зарядки/розрядки при максимально допустимій глибині розряду близько 80%. Останнім часом компанія виступає не тільки як виробник обладнання, але й позиціонує себе як постачальник послуг на ринку електроенергетики.

У листопаді 2015 року компанія запустила в Німеччині амбітний проект. Платформа SonnenCommunity – це можливість створити віртуальний пул з власників сонячних систем і електричних батарей. Надлишки електроенергії, отриманої сонячними батареями і не використані в побуті, можуть бути розподілені серед учасників віртуальної мережі, наприклад, можуть бути спрямовані на підзарядку акумуляторної системи в іншого власника, а пізніше – реалізовані на оптовому ринку. З огляду на різке падіння цін на «зелену» електроенергію, це дозволить її виробникам продавати її в реальному часі в момент, коли ціни будуть найбільш сприятливими. До платформи може підключитися будь-який користувач, який придбав обладнання

компанії. Sonnen також використовує нове програмне забезпечення, яке може візуалізувати агреговане зберігання в режимі реального часу.

Фахівці розглядають Sonnen як найбільш реального конкурента Tesla – компанія вже продала близько тисячі систем для домашніх сонячних електростанцій. Правда, вартість зберігання енергії в системах Tesla нижче, але в Sonnen наполягають на своїй перевазі по терміну служби і кількості циклів заряд/розряд.

Технологія Smart Towns

В Японії, де щорічно зводиться близько 1 мільйона нових будинків, з 2020 року обов'язковим стане стандарт Zero Energy Homes (ZEN). Panasonic і інші японські фірми, прямі конкуренти «Гігафабріки» Tesla, вже багато років продають місцевим клієнтам готові рішення для домашніх сонячних електростанцій, в яких система зберігання електроенергії поки пропонується як додаткова опція [16].

Компанія Panasonic реалізує власну програму «розумного» міста, розташованого біля Йокогами. Передбачається, що в межах цього міста всі домашні сонячні електростанції і системи накопичення енергії будуть об'єднані в єдину мережу. Це дозволить не тільки забезпечити енергонезалежність міста, а й в перспективі – вийти на японський оптовий ринок продажу електроенергії.

Panasonic – один з найбільших в світі виробників потужних накопичувальних батарей, великі обсяги виробництва дозволяють компанії реалізовувати продукцію за дуже конкурентною ціною. Smart Towns – молодий, але амбітний проект, в якому Panasonic постарается реалізувати нові підходи в накопиченні і розподілі електричної енергії. При цьому компанія буде спиратися на досвід, набутий недавно в Канаді, де Panasonic реалізувала великий проєкт «сонячні батареї + акумулятор». Крім того, компанія реалізує кілька проєктів по створенню систем зберігання електрики для житлових будинків в Австралії, хоча і зіткнулася там з сильною конкуренцією.

Технологія сірчано-натрієвих батарей

Японська компанія NGK Insulators однією з перших вийшла на світовий ринок систем накопичення та зберігання електрики з технологією сірчано-натрієвих батарей з рідким електролітом. На сьогоднішній день сумарна потужність акумуляторів, встановлених по всій земній кулі NGK Insulators, становить близько 3 ГВт, в тому числі на основі акумуляторів саме цього типу в Японії створена найбільша в світі мережа накопичувальних батарей. У період з 2007 по 2010 рік на компанію припадало 66% ринку акумуляторів для довготривалого зберігання електрики. Завдяки особливості технології, сірчано-натрієві

батареї мають великий термін експлуатації, але при цьому пожежонебезпечні через високу робочу температуру [17].

Незважаючи на те, що літій-іонні батареї більше підходять для створення масштабних систем зберігання електрики, ніж акумулятори з рідким електролітом, останні ще досить довго будуть зберігати свої позиції в якості альтернативної технології для довготривалого накопичення електроенергії. Наприклад, зовсім недавно компанія виграла тендер на будівництво великої системи акумуляування енергії (35 МВт – 280 МВт) в Італії.

Технологія Intensium li-ion battery

Французька компанія Saft стала одним з головних ньюсмейкерів після того, як вона була придбана нафтовим гігантом Total за 1 мільярд доларів – це сама велика угода для виробників акумуляторів. До зміни власника, компанія брала активну участь в проєктах по всьому світу, створюючи системи зберігання та управління електроенергією на основі літій-іонних батарей власного виробництва. Основну увагу компанія зосередила на проєктах у віддалених районах, де з самого початку високі ціни на електроенергію. Як приклад можна привести установку системи потужністю 1,2 МВт для віддаленого селища на Алясці, велика сонячна електростанція в анахола (Гаваї), а так само недавно отриманий контракт на створення системи накопичення енергії на 10 МВт в Пуерто-Ріко. Фахівці поки обережно коментують зміну власника, відзначаючи, що на перших порах компанія, перш за все, за обсягами продукції, що випускається, не зможе конкурувати з такими визнаними лідерами галузі як LG Chem, Samsung SDI, Tesla і Panasonic.

Технологія Pure Wave S & C

Компанія S & C Electric має більш ніж віковий досвід в проєктуванні і будівництві інженерних комунікацій, захисту і створення систем управління для електричних мереж. На сьогоднішній день S & C Electric – один з лідерів в області інноваційних програмних рішень для підвищення надійності мережі, їх продуктивності і ефективності. Компанія спеціалізується на розробці і впровадженні рішень як для комерційних і виробничих об'єктів, так і приватних будинків, а також автономних систем енергозабезпечення. Приміром, компанія в Техасі об'єднала в єдину мережу 4 електричних мікромережі, що мають різні джерела генерації електрики – в тому числі і сонячну, а також кілька систем зберігання електрики. Крім того, компанія розробила одну з найбільших систем зберігання електрики в

Великобританії. Ще один проєкт потужністю 7 МВт – Half Moon Ventures, в місті Мінстер, штат Огайо [18].

Технологія Aqueous Hybrid Ion battery

Розроблений Aqueion гібридний іонний акумулятор, який використовує натрій-іонний водний розчин (на основі морської води), повинен стати найбільш екологічно безпечною і чистою батареєю на ринку. Серед інших акумуляторів з рідким електролітом, технологія Aqueion орієнтована, перш за все, на тривале зберігання електроенергії.

Компанія успішно забезпечила фінансування проєкту на ранніх стадіях розробки технології. За розрахунками інженерів компанії, після початку масового виробництва гібридних акумуляторів, їх вартість повинна скласти близько 160 доларів за 1 кВт / год. Але судити про те, наскільки реально ця заява – поки рано. На сьогоднішній день компанії залучила майже 200 мільйонів доларів інвестицій, але при цьому вдалося реалізувати всього кілька комерційних проєктів на основі гібридних акумуляторів. При цьому, всі вони були виконані на ринках, де вартість електроенергії дуже висока, наприклад, в Пуерто-Ріко. Щоб технологія Aqueous Hybrid Ion battery отримала хороші комерційні перспективи, компанії-розробнику варто дуже серйозно попрацювати над скороченням витрат.

Технологія Zinc-iron flow battery

Компанія ViZN – ще один із виробників, що робить ставку на акумулятори великої ємності з рідким електролітом. На сьогоднішній день акумулятори, що виробляють електроенергію за рахунок хімічної реакції заліза і цинку, доступні в різних конфігураціях. Вони використовуються в якості резервного джерела в домашніх системах, для мереж накопичення і перерозподілу електроенергії, а також для створення автономних енергомереж, наприклад, для розробки віддалених родовищ в гірській промисловості. Про перспективність технології може говорити той факт, що недавно компанія виграла тендер на створення системи стабілізації напруги в Онтаріо (Канада) потужністю 2 МВт / 6МВт [19].

При цьому фахівці відзначають, що нова технологія Zinc-iron flow battery все ще потребує підтвердження своєї комерційної привабливості. При значному скороченні витрат на її виробництво, батареї цього типу можуть претендувати на значну частку ринку акумуляторів тривалого (3+ години) дії. Крім того, залізно-цинкові акумулятори, які мають некіслу середу, мають кращі показники життєвого циклу системи та продуктивність, ніж інші існуючі нині акумулятори з рідким електролітом. Саме тому стратегічне завдання

ViZN – розсудливо розпорядитися залученими інвестиціями, зосередившись на скороченні витрат за рахунок вдосконалення технології виробництва і нарощування обсягів випуску.

Технологія RESolve

Багатопрофільна проектна компанія RES стала одним з ініціаторів будівництва великомасштабного сховища потужністю 88 МВт, ще одне – набагато потужніший, на 200 МВт, знаходиться на стадії проектування.

В основу проектів компанії покладена власна система RESolvecontrol, яка дозволяє інтегрувати в єдину систему пристрої зберігання електроенергії з джерелами генерації (сонячними батареями, вітрогенераторами і т.д.). Система RESolve автоматично визначає оптимальний режим роботи, який дозволяє мінімізувати ризики, правильно перерозподілити отриману енергію для отримання максимального прибутку від оптового продажу енергії в загальну енергосистему. На сьогоднішній день компанія реалізувала близько 10 власних проектів. Крім того, програмна платформа Resolve використовується в декількох сторонніх проектах.

Технологія YCube

Німецько-американська компанія Younicos є одним з провідних постачальників програмного забезпечення для систем зберігання енергії і системних інтеграторів. Компанія, яка виросла з дослідницької лабораторії, має дуже сильні позиції в сонячній і вітряній енергопромисловості Німеччини. Компанія розробила безліч програмних рішень і утиліт для багатьох масштабних проектів в Німеччині. Останнім часом компанія зайнялася просуванням на ринок власного обладнання для накопичення енергії під маркою Y.Cube [20].

Особливість Y.Cube – це модульна система, яка може підключатися до різних джерел генерації електрики. Модульна конструкція дозволяє створювати системи потужністю від 200 кВт до 10 МВт (для тривалого зберігання електроенергії), і більш потужні системи – до 20 МВт (для зберігання електрики на більш стислі терміни). При цьому програмне забезпечення дозволяє легко налаштувати систему управління системою.

Технологія Advancion

Технологія Advancion – результат більш ніж 30 років роботи компанії на ринку електроенергетики, з яких останні 8 років компанія активно працює в сегменті комерційного накопичення енергії і програмного забезпечення управління системами зберігання електроенергії. Для комунальних та промислових об'єктів компанія

пропонує стандартні конфігурації систем зберігання енергії потужністю від 100 кВт до 1000 МВт. На сьогоднішній день компанія реалізувала кілька масштабних проєктів в Великобританії, Чилі та Нідерландах, до кінця 2016 року приєднається ще кілька об'єктів в Індії, Домініканській Республіці і Філіппінах.

Програмне забезпечення AES дозволяє сполучати різні джерела генерування електроенергії, що особливо важливо в моменти пікових навантажень. Одна з переваг рішень, що пропонує AES – модульний принцип побудови, який дозволяє нарощувати потужність у міру зростаючих потреб користувача. У наприкінці 2015 року компанія випустила 4 версію Advancion. Технологія Advancion легко інтегрується з уже існуючим програмними продуктами диспетчеризації енергозабезпечення. Співпраця AES з провідними виробниками промислових акумуляторів дозволяє істотно знизити витрати і час розгортання при створенні потужних систем зберігання енергії.

Технологія Hybrid Electric Buildings

Програмне забезпечення AMS дозволяє оптимізувати управління наявними ресурсами. Використовуючи передові технології управління навантаженням, за рахунок інтеграції різних джерел електроенергії і диспетчеризації потужності, AMS гарантує своїм замовникам безперебійне забезпечення енергією навіть при самих пікових навантаженнях. Компанія вже реалізувала один великомасштабний проєкт в Каліфорнії – систему зберігання на 3,5 МВт для заводу по обробці та очищення води, зараз компанія зайнята реалізацією ще більшого об'єкту – на 50 МВт. Для побудови системи зберігання AMS використовує Tesla Powerpacks [21].

Технологія AC battery

Австралійська компанія Enphase часто розглядається як конкурент Tesla насамперед за рахунок просування принципово іншого принципу зберігання енергії – батарей змінного струму – AC battery. Наприкінці 2015 року компанія представила на ринку власну модульну батарею для домашніх енергонакопительних систем потужністю 1,2 кВт / год за ціною близько 838 доларів за 1 кВт / год. Батарея адаптована до вже існуючих сонячних електростанцій і може бути встановлена у замовника протягом 1,5 годин. Компанія дає гарантію 10 років на літій-залізо-фосфатні акумулятори. В даний час компанія приймає замовлення на установку систем в Австралії і Новій Зеландії, але до кінця цього року планує вийти на ринок США, а в 2017 – запуснитися в Європі.

Технологія V2G and 2nd EV life batteries

Партнерство японської автомобільної компанії Nissan з інженерним гігантом Eaton, що вже мають великий досвід у створенні популярних електромобілів Nissan LEAF, направлено на створення промислових систем накопичення і зберігання енергії. Поки компанії реалізують xStorage – пілотний проект у Великобританії зі створення резервної системи електроживлення для житлового комплексу [22].

Наведений в вище матеріал дозволяє зробити кілька важливих висновків:

– по-перше, системи зберігання енергії вже мають економічний потенціал при виконанні деяких умов. Про це часто забувають, не враховуючи державні дотації для проектів зі зберігання енергії і економічні втрати від перебоїв в подачі електроенергії.

– по-друге, при проектуванні системи зберігання енергії необхідно вирішити яка технологія (літій-іонна, свинцево-кислотна, лужна або інша) більше підійде для досягнення ваших цілей. Стратегія з використанням декількох технологій буде коштувати дорожче, але і дозволить вашій системі бути більш гнучкою.

– нарешті, найбільш важливий висновок полягає в наступному: розвиток ринку систем зберігання енергії може перевернути існуючу модель енергетичного забезпечення світу. Сьогодні нетрадиційна енергетика використовується в основному для задоволення миттєвої потреби в енергії. Системи ж зберігання енергії допомагають згладжувати різницю між періодами генерації енергії і навантаження на мережу. Згодом, відновлювані джерела енергії будуть все більше і більше замінювати звичні вугілля і газ.

Через мінливість виробництва електроенергії вітрогенераторами або сонячними панелями системи зберігання енергії стали важливим атрибутом систем енергозабезпечення. Накопичена за день електроенергія подається в мережу ввечері або в пікові моменти споживання, коли енергії, що генерується сонячною електростанцією виявляється недостатньо для потреб споживача. При цьому слід розуміти, що система накопичення і зберігання енергії – це не просто акумулятор, провідні світові компанії вкладають в це поняття дещо інший сенс. Вони пропонують споживачеві комплексне рішення, яке включає в себе як власне акумулятори (накопичувачі), так і програмні рішення, які забезпечують контроль за станом накопичувачів і оптимальним розподілом навантаження [22].

Першим конструктором паливного (біопаливного) елемента була не людина. Як встановили біохіміки, біологічний воднево-

кисневий паливний елемент (ПЕ) міститься в кожній живій клітині. У живому організмі джерелом енергії слугує їжа. У травній системі вона розкладається до мономерів, які внаслідок хімічних перетворень дають водень. Кисень потрапляє в кров через легені, з'єднується з гемоглобіном і транспортується до всіх тканин організму. Процес сполучення водню з киснем є основою біоенергетики організму [1].

Таким чином, все створене природою є доцільним і працює з максимальним коефіцієнтом корисної дії (ККД), тому не дивно, що паливним елементом зацікавилася людина. ПЕ відносяться до хімічних джерел струму, які здійснюють пряме перетворення енергії палива в електричну енергію, минаючи малоефективні, що йдуть з великими втратами, процеси горіння. ПЕ – це електрохімічний пристрій, який у результаті високоефективного "холодного" горіння палива безпосередньо виробляє електроенергію. В свою чергу, рукотворний біопаливний елемент (БПЕ) – це біоелектрохімічний пристрій, який у результаті високоефективного "холодного" горіння палива безпосередньо може продукувати як електроенергію, так і біоводень [6].

ПЕ і БПЕ мають здійснити революцію в споживанні енергії. Люди мають дійти висновку, що, виробляючи тепло й електроенергію традиційними способами з вуглеводневого палива, вони можуть використати лише близько третини тієї енергії, що міститься в паливі, а решта просто втрачається. Це означає, що людська спільнота повинна задовольнятися лише однією третиною всіх органічних видів палива, що зараз використовуються. ПЕ дають унікальну можливість використовувати цю втрачену частку енергії в дуже гнучкій формі – у формі електроенергії. Крім істотної економії енергії, ПЕ дозволяють серйозно зменшити викиди шкідливих забруднень, які є типовими для електростанцій і транспорту на двигунах внутрішнього згорання.

Паливні елементи були відкриті ще в далекому 1839 році В. Грове, коли він вивчав електроліз води [23]. Відкриття процесу електрохімічного "холодного" горіння водню стало знаменною подією в енергетиці, і в подальшому відомі електрохіміки В. Оствальд і В. Нернст відіграли визначальну роль у розвитку теоретичних основ і практичній реалізації ПЕ та передбачили їм велике майбутнє. Багато науковців зацікавилися новим винаходом і почали його досліджувати, але тут світ побачило ще одне велике відкриття – усім відомий двигун внутрішнього згорання. Цей факт, у поєднанні зі стрімким розвитком інфраструктури добування нафти, відтіснив ПЕ на задній план.

Сьогодні, озираючись назад, розумієш, що В. Нернст і

В. Оствальд занадто випередили свій час. Якими б геніальними не були винахідники часів В. Оствальда, вони не могли впоратися з проблемою, що стоїть на стику декількох областей знання, і вирішити завдання, що вимагає організації спільної роботи вчених різних спеціальностей – електрохіміків, фізиків, мікробіологів, математиків, фахівців з електроніки, хімічної технології, електротехніки та ін. Усьому цьому навчилися пізніше: при роботі над атомними і космічними проектами. Ніби передчуваючи всі ці труднощі, В. Оствальд недарма назвав проблему ПЕ "філософським каменем електрохімії".

В середині минулого століття почався новий штурм проблеми створення ПЕ. Частково це пояснюється появою нових ідей, матеріалів і технологій у результаті оборонних досліджень [23, 24].

Класифікація і стисла характеристика паливних елементів.

Існують різні класифікації ПЕ: за вихідними речовинами електродних реакцій (водень-кисневі, метано-кисневі та ін.), за видом перетворення вуглеводневого палива (внутрішня чи зовнішня конверсія), за значенням робочої температури (низько-, середньо- та високотемпературні), за складом електроліту (лужні, кислотні, полімерні, твердооксидні, з розтопленим електролітом), типом палива і окиснювача. Найбільш вдалою з точки зору авторів є класифікація ПЕ за складом електроліту, оскільки вона визначає і робочу температуру, і йонний характер електродних реакцій, і вид перетворення палива [25, 26].

За типом окиснювача ПЕ умовно поділяють на кисневі та повітряні (в останньому випадку в якості окиснювача використовують кисень повітря). За типом палива виділяють водневі, метанольні і ПЕ на природному газі, хоча останні з "хімічної" точки зору слід віднести до "водневих", тому що природний газ попередньо піддається конверсії. За температурою експлуатації їх умовно ділять на низькотемпературні (до 100-150°C), середньотемпературні (близько 200-400°C) і високотемпературні (більше 500°C).

У даний час відомо декілька видів ПЕ, що розрізняються за типом використаного електроліту і палива. Виходячи з аналізу становлення ПЕ, найбільшого поширення набули наступні типи (таблиця 1.1):

Таблиця 1.1 – Типи паливних елементів

Технологія ПЕ	Тип електроліту – тип палива	Робочі температури, °С	ККД вихідної електричної енергії, %	Стан технології. Сумарний ККД, %
ПЕ з протонообмінною мембраною PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	Полімерна мембрана водень	60÷160	30÷35	Найбільш активно ведуться розробки в сегменті автомобілебудування. Найбільш потужна установка – 300 кВт. Гарні перспективи портативних установок. 50÷70
ПЕ з прямим окисненням метанолу DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)	Полімерна мембрана – метанол	50÷120	до 40	Ще недавно розробки в цьому напрямку вважалися найбільш перспективними для ринку портативної електроніки. Зараз акцент зміщений у бік DBFC
Лужні ПЕ AFC (Alkaline Fuel Cell), DBFC (Direct borohydride fuel cells)	Гідроксид калію – водень (борогідрид натрію)	25÷250	до 50÷60	Основне застосування в космічній галузі, гарні комерційні перспективи у зв'язку з дешевою системою
ПЕ на основі ортофосфорної (фосфорної) кислоти PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	Фосфорна кислота – водень	150÷220	35÷45	Найбільш "зріла" технологія. Промислове застосування у великих установках. У даний час найбільший парк

				ПЕ побудований на основі технології PAFC. 70÷85
Твердотільні оксидні паливні елементи SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	Керамічний елемент – водень, природний газ, метанол, етанол та ін.	650÷1000	50÷60	Проекти для електро- і тепlopостачання приміщень. 60÷70
Паливні елементи на основі розплавленого карбонату MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells)	Карбонати літію і натрію – природний газ, біогаз, синтетичний газ, метан, пропан	600÷700	45÷60	Лідер сегменту великих промислових установок. 70÷80

ПЕ з протонообмінною мембраною (PEMFC – Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, Proton Exchange Membrane Fuel Cell).

У якості електроліту в таких ПЕ використовується полімерна мембрана. Відновником виступає чистий водень. Розробка цього типу ПЕ була розпочата компанією *General Electric* ще в кінці 50-х років минулого століття, і однією з основних проблем стало створення хімічно стійкої протонообмінної мембрани з низьким питомим опором і високою механічною міцністю.

Протонпровідні мембрани – це полімери з іоногенними (дисоціюють на іони) групами, що утворюють водонерозчинні іонообмінні мембрани за рахунок просторової зшивки полімерних ланцюгів. При контакті з водою мембрана набухає і відбувається дисоціація іоногенних груп, у результаті чого іони водню отримують можливість переміщуватися між фіксованими в полімері кислотними, зокрема, сульфогрупами. В даний час у ПЕ застосовуються фторовані та перфторовані протонпровідні мембрани, які мають відносно низький опір, високої механічну міцність і хімічну стійкість. Хоча така мембрана тонка (близько 120 мкм), вона має низьку газопроникність і знижує ймовірність змішування вибухонебезпечних реагентів у порівнянні з лужними ПЕ. В якості електрокаталізаторів використовують платинову чернь на вуглецевому носії та інші метали платинової групи. Електричний контакт, підведення газівреагентів і відведення води, що утворюється, здійснюють за рахунок щільного притиснення пористих

колекторів струму з вуглеграфітових тканин або паперу. Оскільки мембрани і каталізатори не взаємодіють з CO, в якості окиснювача може бути використане атмосферне повітря. Екологічна чистота, висока питома потужність і низька інерційність роблять ці ПЕ досить перспективними для використання не тільки в космосі та підводному флоті, а й у побуті, в першу чергу, для транспортних засобів. У даний час в Канаді створені і проходять випробування екологічно чисті автобуси на ПЕ цього типу потужністю до 250 кВт та ККД енергоустановки до 55%. Низькі робочі температури і високий ККД роблять ці ПЕ перспективними для децентралізованого енергопостачання, зокрема для енергоустановок на основі відновлюваних джерел енергії (фотобатареї, вітроенергоустановки тощо), для отримання електроенергії з природного газу з попередньою конверсією. Великий інтерес представляє створення оборотного пристрою електролізерпаливний елемент, де твердополімерні системи є також вельми перспективними [27].

Подальший розвиток ПЕ цього типу багато в чому пов'язаний зі зниженням вартості ПЕ і витрат платини, які до теперішнього часу в реальних установках вже знижено до 0,6 мг/см у порівнянні приблизно з 10 мг/см на початку 60-х років. Тобто витрата платини стала меншою (1 г/кВт) і продовжує знижуватися. Певною проблемою твердополімерних (як і лужних) ПЕ є чутливість електрокаталізаторів до оксиду вуглецю, присутнього в конверсійному водні. Однак прогрес у технології отримання водню, поряд із розробкою каталізаторів, вже зараз дозволяє працювати при вмісті CO менше 0,1%, що дає надію на успішне вирішення цієї проблеми. Серед усіх паливних елементів PEMFC знайшли сьогодні найбільше застосування: вони використовуються в транспортних засобах (майже 100% всіх автомобілів, що працюють на водні), у портативній електроніці.

ПЕ з прямим окисненням метанолу (DMFC– Direct Methanol Fuel Cell).

ПЕ цього класу є одним із варіантів реалізації елементів з іонообмінною мембраною. У них використовується той же електроліт, що і в найбільш поширених PEMFC, але як паливо використовується водний розчин метанолу, а не водень у чистому вигляді. Безумовна перевага DMFC в порівнянні з PEMFC

– можливість використання метанолу в рідкому вигляді, який більш зручно зберігати і перевозити, ніж водень. На відміну від інших технологій, у яких використовується рідина замість газу, в DMFC немає

необхідності в застосуванні зовнішнього конвертора для отримання чистого водню та здійснення процесу "реформінгу" – виділення водню з метанолу відбувається безпосередньо на електроліті.

Недоліком DMFC в порівнянні з PEMFC є більш висока температура функціонування (120°C), яка, однак, не є достатньою для ефективного хімічного перетворення. У зв'язку з цим виникає необхідність у використанні дорогих каталізаторів на основі платини, що неминуче призводить до збільшення вартості ПЕ. Крім того, метанол отруйний і токсичний [28].

Лужні ПЕ (AFC – Alkaline Fuel Cell; DBFC– Direct borohydride fuel cells).

У якості електроліту в лужних елементах використовується концентрований гідроксид калію або його водний розчин. Матеріалом для виготовлення електродів слугує нікель. Лужні елементи значно поступаються PEMFC за питомою потужністю, внаслідок чого їх габарити значно більші. У AFC в якості палива повинен використовуватися чистий водень, як окисник – чистий кисень. У цьому і полягає їх основний недолік, оскільки вміст у паливі або окиснювачі домішок вуглекислого газу призводить до карбонізації лугу. Лужні ПЕ інтенсивно розроблялися в рамках космічних програм і донині є основними у цій області. У США лужні ПЕ успішно використовувалися для програм *Apollo* і *Space Shuttle*, як, наприклад, розроблена в 1979 р. установка потужністю до 36 кВт, що пройшла випробування в багатьох польотах.

Недоліками цих ПЕ є: необхідність застосування великої кількості благородних металів для активації електродів; висока чутливість каталізаторів до каталітичних отрут; певна нестійкість електроліту, зокрема, неможливість застосування повітря в якості окиснювача (через реакцію лугу з діоксидом вуглецю) і вимивання водою, що утворюється, лугу з азбестової матриці; невисокий ресурс (для установки "Фотон" він склав 5000 годин) і загальна висока вартість. Це робить недоцільним їх застосування в енергетиці. Однак накопичений досвід стимулював розробку транспортних засобів на лужних ПЕ. Але подальшого розвитку ці роботи не отримали. Перевагами AFC є низька собівартість їх виробництва, можливість використання більш дешевих нікелевих і срібних каталізаторів, а також абсолютна екологічна чистота гарячої води, одержуваної в якості відходів. До останнього часу технологія прямого окиснення метанолу вважалася найбільш перспективною для живлення портативної мікроелектроніки. Однак наявні в сегменті DMFC проблеми

(токсичність метанолу і висока вартість каталізаторів) стимулювали розвиток досліджень у галузі технології AFC.

ПЕ з прямим окисненням борогідриду натрію (DBFC – Direct borohydride fuel cells).

У порівнянні з метанолом, борогідрид натрію і тетраборат натрію менш токсичні, борогідрид має велику густину енергії. Крім того, його використання дозволяє скоротити витрати на каталізатори з благородних металів [29].

ПЕ на основі ортофосфорної (фосфорної) кислоти (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell).

В цих ПЕ у якості електроліту використовується рідка фосфорна кислота. Підвищення температури ПЕ всього до 200-300°C забезпечує вирішення кількох задач: зменшується перенапруга реакцій на електродах, зменшується кількість каталізаторів на основі благородних металів та їх чутливість до отрути, полегшується процес видалення води та ін. На жаль, твердополімерні ПЕ (PEMFC) не можуть поки що працювати при температурах більше 100-120°C через деструкцію мембран та інших елементів ПЕ. У принципі для збільшення температури можна використовувати концентровані розчини різних неорганічних кислот, але при температурі вище 100-120°C більшість таких розчинів нестійкі або мають дуже високу окиснювальну чи корозійну активність, тому в середньотемпературних ПЕ з фосфорнокислим електролітом температура складає близько 200°C. Електродами у фосфорнокислих ПЕ слугують вуглеграфітові пластини з платиновим каталізатором. Електроліт знаходиться в пористій термостійкій матриці, наприклад, з карбиду кремнію і тефлону. В даний час тільки на основі фосфорнокислих ПЕ створені дослідні енергоустановки потужністю в кілька МВт. PAFC застосовуються на великих стаціонарних об'єктах і служать для виробництва як електроенергії, так і теплоти. Працюють ці ПЕ на водні, однак вимоги щодо його чистоти значно менш суворі, ніж у випадку використання PEMFC. У більшості випадків водень отримують з природного газу або біогазу. Окисно-відновний процес перебігає при температурах 150-220°C. Ефективність процесу вироблення електроенергії оцінюється в 35-45% і до 85% при використанні теплової енергії, що відводиться. Сегмент PAFC вважається самим відпрацьованим серед усіх технологій ПЕ. PAFC стабільно розвивається завдяки можливості використовувати водень із домішками. Сумарна потужність усіх світових установок, що функціонують на основі рідкої фосфорної кислоти, перевищує 75 МВт. Інноваційними можна вважати декілька спроб використання PAFC в

автомобільних застосуваннях [30].

Твердотільні оксидні паливні елементи (SOFC – Solid Oxide Fuel Cell).

ПЕ з твердим керамічним електролітом. Відмінність від раніше розглянутих видів полягає у високих температурах реакції (650-1000°C) і різноманітності застосовуваного палива: природний газ, водень, пропан, біогаз, інші вуглецевмісні ПЕ. ККД електрохімічного перетворення становить 50-60%, з урахуванням теплової енергії – до 80%. Основною сферою застосування цієї технології вважається виробництво джерел електричної і теплової енергії для різноманітних житлових, адміністративних та інших приміщень. Деякі компанії ведуть розробки систем для промислового використання. SOFC широко застосовуються в якості первинних і портативних резервних джерел енергії великої ємності. Останнім часом ведуться розробки щодо використання SOFC в автомобільній промисловості, проте, на відміну від PEMFC, мова йде тільки про допоміжні системи, а не про двигун. Спільно з PEMFC ця технологія активно використовується в малих стаціонарних областях застосування виробничих установок. У великих стаціонарних областях застосування є досвід виробництва комерційних установок потужністю 1 МВт.

ПЕ на основі розплавленого карбонату (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cells).

ПЕ на основі розплавленого карбонату (солі натрію або літію) функціонують при достатньо високих температурах – 600-700°C. Збільшення робочої температури ПЕ веде до росту швидкості електродних процесів і дозволяє зменшити поляризацію електродів (тобто різницю між E і U) і трохи компенсувати зменшення ЕРС воднево-кисневих ПЕ. При таких температурах можна застосовувати менш активні, ніж платинові метали, електрокаталізатори і в перспективі позбутися благородних металів. Високі температури також дозволяють розширити діапазон застосовуваних палив, тому що високопотенційне тепло, що генерується установкою, може бути ефективно, з мінімум додаткових енерговитрат, використане як для зовнішньої, так і внутрішньої (відбувається безпосередньо у ПЕ) конверсії природного газу, метанолу тощо. При високих температурах знижується чутливість електродів до домішок у паливі, які є каталітичними отрутами. Ці ПЕ можуть бути використані для комбінованого виробництва електричної і теплової енергії, що дозволяє підвищити їх "сумарний ККД". В якості електролітів у ПЕ цього типу використовують розплави карбонатів лужних металів (при температурі

650°C), зокрема електроліти в матриці з пористої кераміки на основі оксидів металів. У цих ПЕ застосовуються неплатинові електроди – пористий нікель, оксиди нікелю, ферити, манганати. Однак висока корозійна активність електроліту створює проблеми ресурсу роботи електродів і конструкційних матеріалів. У даний час відбуваються дослідні та демонстраційні випробування кількох енергоустановок, одна з яких – установка компанії *MTU* (Німеччина) – має максимальну потужність одиничного модуля – 280 кВт. Область застосування цих ПЕ – стаціонарні установки на 1 МВт і вище, тому що при менших потужностях робочі значення ККД знизяться до 30-40%. Такі робочі температури дозволяють використовувати паливо безпосередньо в самій комірці. ПЕ на основі розплавленого карбонату вимагають значного часу запуску і не дозволяють оперативно регулювати вихідну потужність, тому основна область їх застосування – великі стаціонарні джерела теплової та електричної енергії. Вони відрізняються високою ефективністю перетворення палива – ККД вихідної електричної енергії – до 60% [30].

Широке промислове використання такої технології зумовлюють три чинники: електрохімічні процеси в MCFC не вимагають використання дорогих каталізаторів; як паливо може використовуватися цілий ряд натуральних і синтетичних палив; високі температури перебігу процесів не потребують додаткових реформерів для перетворення палива.

Недолік MCFC полягає в тому, що вони не можуть працювати на чистому водні, а високі температури і хімічні реакції можуть призвести до корозії і прискорити процес зносу елементів конструкції.

Елементи на твердому паливі (MAFC – Metal Air Fuel Cells).

В якості електроліту ПЕ використовується гідроксид калію, а паливом можуть слугувати різні метали: алюміній, магній, кальцій, цинк, залізо. Тверді електроліти на основі оксидів металів – це керамічні матеріали, провідність яких обумовлена транспортом іонів по дефектах кристалічної ґратки. Хоча відома досить велика кількість оксидів, які володіють як кисневою, так і водневою провідністю при підвищених температурах, реальні ПЕ створені поки що на основі ZrO, стабілізованого, наприклад, YO, ScO або CaO, які утворюють з ним тверді розчини і забезпечують ефективну іонну провідність по кисневих вакансіях (робоча температура 800-1000°C). Як у розплавлених карбонатних, так і в твердооксидних ПЕ проводиться попередня конверсія природного газу і реально паливом є все той же водень. Але,

оскільки конверсія може проводитися безпосередньо в ПЕ, то формально паливом вважають природний газ.

Ці ПЕ вкрай привабливі, тому що можуть використовувати неплатинові каталізатори (пористий нікель на аноді та змішані оксиди – кобальтити, манганіти, хроміти на катоді), що розширює діапазон видів палива. Вони відносно легко вбудовуються в різні енергетичні цикли за рахунок високопотенційного тепла продуктів реакції.

Однак високі температури вимагають вирішення низки конструкційних проблем, таких як, наприклад, "сумісність використовуваних матеріалів при температурному розширенні". Поки що потужність одиничних модулів твердооксидних ПЕ та енергоустановок на їх основі одна з найменших.

Компанія Westinghouse Electric Corporation ще в 1992 році побудувала в Японії дві установки потужністю 25 кВт, що працювали на природному газі, і до 1994 року закінчила випробування однієї з установок, яка напрацювала ресурс більше 7000 годин. На іншій установці напрацьовано безперервний ресурс 13000 годин, причому було проведено 11 циклів пусків-зупинок, які є найбільш небезпечними для цих ПЕ через можливість чисто механічних пошкоджень при настільки великому інтервалі зміни температур. Цією ж компанією був досягнутий ресурс роботи ПЕ на основі керамічних елементів трубчастої конструкції більше 50000 годин. Зараз закінчено виготовлення установки на 100 кВт для демонстраційного проекту в Нідерландах і розробляється установка на 250 кВт для експлуатації в США. Елементи трубчастої конструкції мають ряд недоліків: товсті стінки трубок з електроліту, необхідні для надання їм механічної міцності, володіють високим опором, є проблеми комутації одиничних елементів [31].

1.2 Джерела електричної енергії міського електричного транспорту

Автономний електричний транспорт (АЕТ), який повністю або частково незалежний від контактних мереж (КМ), останніми роками набуває все більшого поширення в розвинутих країнах світу. Це пов'язано з намаганням скоротити викиди вуглекислого газу та інших токсичних речовин, що продукуються двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) автомобільного транспорту. АЕТ потребує значно менших витрат на створення й утримання інфраструктури (контактні і кабельні мережі, тягові підстанції), аніж традиційний контактний електротранспорт.

У містах із розвинутими мережами традиційного електротранспорту доцільним є застосування АЕТ для обслуговування напрямів, де відсутні великі пасажиропотоки, які окупили б будівництво контактних і кабельних мереж (ККМ) і тягових підстанцій (ТП), або наявні перешкоди для будівництва інфраструктури традиційного електротранспорту. Джерела живлення АЕТ розміщені безпосередньо на транспортному засобі. Це тягові акумуляторні батареї (ТАБ), батареї суперконденсаторів (іоністорів) та паливні елементи для прямого перетворення енергії хімічної реакції на електричний струм разом із буферною акумуляторною батареєю. Частково автономний електротранспорт (дуобуси) може використовувати для живлення тягового електродвигуна (ТЕД) енергетичні установки на базі бензинового або дизельного ДВЗ і генератора струму.

Окрема група автономного транспорту – це гіробуси, тобто транспортні засоби, які використовують механічні акумулятори енергії (маховики). У разі застосування електробусів, які живляться від ТАБ чи батареї суперконденсаторів, АЕТ потребує створення інфраструктури – зарядних станцій, які можуть розміщуватися в депо для здійснення статичної (нічної) зарядки, а також на кінцевих зупинках маршрутів – зарядні станції для швидкої (динамічної) зарядки.

Тролейбуси з автономним ходом (АХ) здійснюють зарядку ТАБ від контактної мережі (КМ). Транспорт, що приводиться від паливних елементів (ПЕ), потребує спеціальних станцій для заправки ємностей стиснутим чи зрідженим воднем.

Міський електричний транспорт за способом отримання живлення і залежністю від КМ поділяють на: контактний (трамвай, тролейбус, поїзди метрополітену), безконтактний (електробуси, автобуси з живленням від паливних елементів), а також комбінований («частковий») – тобто такий, який може отримувати енергію від КМ і від бортових джерел. Останні два види електротранспорту називають автономним електротранспортом (АЕТ). Перші електромобілі з'явилися практично одночасно з винайденням трамвая і тролейбуса. Зокрема, перший електромобіль у Чехії був збудований Ф. Кржижиком ще 1895 р., але через велику масу акумуляторних батарей та їх малу ємність електромобілі не знайшли широкого застосування [32].

Зараз одним зі світових лідерів з виготовлення тролейбусів з АХ та електробусів із живленням від АКБ є чеська компанія «Skoda». Також електрообладнання для тролейбусів з АХ виготовляють компанії «Medcom» (Польща), «Кіере Electronik» (Німеччина), «Інформбізнес» (Молдова) та ін. Замість ТАБ у тролейбусах з АХ використовують

також батареї суперконденсаторів (іоністорів). Їх використовує, зокрема, білоруський завод «Белкомунмаш».

Постійне вдосконалення виробництва акумуляторів забезпечило серійне виробництво відносно недорогих ТАБ великої питомої ємності на одиницю маси та об'єму, тому на початку 2000-х років з'явилися серійні електробуси для міських і приміських перевезень.

Лідером у цій галузі є китайська компанія «BYD». У Східній Європі електробуси спільно виготовляють фірми «Skoda» (електрообладнання) і «Solaris» (кузови).

Електробуси-прототипи виготовлені в Україні ТзОВ «СНУП «Електронтранс» (Львів) та АТ «АК «Богдан Моторс» (Луцьк). Паливні елементи, що безпосередньо перетворюють енергію хімічної реакції на електричну, на транспорті можуть застосовуватися тільки паралельно з буферною акумуляторною батареєю.

Вже розроблено «водневий» автобус «Solaris Urbino Hidrogen» [33], а компанія «Skoda» на замовлення Риги виготовила тролейбус, АХ якого забезпечується паливними елементами, але широкого розповсюдження такий транспорт поки що не має. У 50-60-х рр. ХХ ст. був розроблений АЕТ із механічним акумулятором енергії (маховиком великого розміру) – так званий гіробус [34]. Зараз такий транспорт не використовується, хоча дослідники й далі розглядають маховики як перспективний накопичувач енергії.

Автономний транспорт із живленням від акумуляторних батарей можна поділити на дві групи: повністю автономний – це так звані «електробуси із статичною зарядкою», ТАБ яких заряджають уночі в депо і вони впродовж усього дня працюють на маршруті без підзарядки, і частково автономний – електробуси з динамічною зарядкою на лінії та тролейбуси з АХ.

Повністю автономний електротранспорт має дві переваги: він не потребує зарядної інфраструктури на маршрутах, а для зарядки використовує дешевшу «нічну» електроенергію. Його недолік – значна маса, об'єм і вартість ТАБ, які забезпечують йому великий пробіг.

Частково автономний електротранспорт потребує зарядної інфраструктури у вигляді або «швидких» зарядних станцій на кінцевих зупинках, або традиційної КМ. Для цього електробуси оснащують струмоприймачами. Для зарядки ТАБ можна використовувати час на відпочинок і харчування водіїв, передбачений трудовим законодавством.

Будівництвом електробусів і тролейбусів з АХ займається

велика кількість виробників. Це, зокрема, китайські «BYD» та «Youtong», чеські «Skoda» та «SOR», польські «Solaris» та «Ursus Bus», білоруський «Белкомунмаш» та українські ТзОВ «СНУП «Електронтранс», АТ «АК «Богдан Моторс» і ТзОВ «Торговий дім «Літан». Чеська компанія «Skoda Electric» виготовляє електробуси зі статичною (нічною) і динамічною зарядкою від зарядної станції чи від КМ тролейбуса під час руху [21]. Електробуси «Skoda PERUN HE (High Energy)» мають 12 метрів довжини, перевозять до 82 пасажирів (27 місць для сидіння). Живлення забезпечують літій-іонні ТАБ потужністю 160 кВт·год, які забезпечують пробіг заповненого електробуса 150 – 200 км без підзарядки. Повна зарядка ТАБ від електромережі потребує до 5 годин, при використанні спеціальної зарядної станції – близько 70 хв. 12-метрові електробуси «Skoda PERUN HP (High Power)» заряджають свої ТАБ за 5 – 8 хв на зарядних станціях «Skoda Ultra Ultra Charger». Пробіг від однієї зарядки – до 35 км. Такі електробуси вміщують до 85 пасажирів, у салоні – 27 сидінь. Польська компанія «Solaris» розробила типажний ряд електробусів «Urbino electric», які мають довжину 8, 9, 12 і 18 (зічленовані) метрів.

Електробуси-прототипи в Україні створено у 2014 – 2016 рр. Їх виготовили компанії ТзОВ «СНУП «Електронтранс» та АТ «АК «Богдан Моторс». Ці транспортні засоби експлуатуються у Львові та польському Любліні. Технічні характеристики українських електробусів подані в табл. 2. Вартість ТАБ повністю автономного електротранспорту на сьогодні становить близько 40 % від вартості транспортного засобу.

В Україні виробництво тролейбусів з АХ від ТАБ налагоджене у 2017 р. на Південному машинобудівному заводі ім. Макарова у співпраці з компанією ТзОВ «Торговий дім «Літан». Тролейбуси із АХ «Дніпро» Т203 виготовляють на базі кузовів МАЗ 203 і електрообладнання компанії «Інформбізнес» (Молдова). Літій-іонна ТАБ складається зі 160 елементів і має масу 576 кг. Повний заряд ТАБ від контактної мережі триває 40 хв і відбувається під час руху й стоянки тролейбуса. Також тролейбуси з автономним ходом в Україні виготовляє АТ «АК «Богдан Моторс» на базі моделей Т701.17 і Т901.17. Виробник електрообладнання – ТзОВ «Політехносервіс» (Київ).

Глибоку модернізацію тролейбуса «Skoda 21Tr» з впровадженням АХ від ТАБ проведено силами КП «Одесміськелектротранс», заявлений АХ цього тролейбуса – 40 км. На базі кузова МАЗ 203 і електрообладнання компанії «Політехносервіс» тролейбус із АХ від ТАБ побудовано «Вінницькою транспортною

компанією». Як джерела живлення АЕТ можуть використовуватися не тільки літій-іонні ТАБ, а й акумуляторні батареї інших типів [35].

Автономний транспорт із живленням від батарей суперконденсаторів (іоністорів).

Основним недоліком ТАБ, які використовуються для живлення АЕТ, є їх порівняно невисока довговічність. Здебільшого довговічність ТАБ значно менша, ніж у кузова і електропривода тролейбуса чи електробуса. Тому конструктори шукають альтернативні джерела енергії для АЕТ. Одним із таких джерел є суперконденсатори (іоністори), в яких енергія накопичується у вигляді статичного заряду.

Іоністор – двошаровий електрохімічний конденсатор, займає проміжне місце між конденсаторами і хімічними джерелами струму, обкладками якого є подвійний електричний шар на межі розподілу електрода та електроліту. Іоністори повністю безпечні у використанні та не потребують догляду, їх зарядка відбувається дуже швидко.

Сучасні іоністори, які використовуються як накопичувачі електричної енергії в АЕТ, значно відстають від усіх типів ТАБ за своїми показниками енергоємності на одиницю маси та об'єму – переважно 5 – 30 Вт·год/кг і 1 – 1,5 Вт·год/л, проте значно перевищують їх за питомою потужністю – 4 – 5 кВт/кг.

Водночас сучасні іоністори можуть без втрати ємності витримувати понад 500 тис. циклів заряду-розряду, тобто ресурсу іоністорів вистачить на 50 років роботи електробуса, що перевищує ресурс його ТЕД та кузова. Типажний ряд електробусів із живленням від батарей іоністорів розроблений компанією «Белкомунмаш» і включає моделі довжиною 9 м (Е490), 12 м (Е420 та Е321) і 18 м (Е433). У Мінську електробуси Е433 «Vitovt Max Electro» з травня 2017 р. працюють із пасажирами на маршрутах. Зарядка батарей іоністорів відбувається за допомогою струмознімачів на даху електробуса на трьох зарядних станціях, які розташовані на кінцевих точках маршруту. Зарядка триває 5 – 8 хв, максимальна величина струму зарядання – 500 А. Заявлена виробником величина АХ – до 40 км (для моделі Е321). Так, на відміну від ТАБ, у яких напруга падає лише незначно залежно від глибини розряду, у іоністорів при постійному струмі розрядки вона падає практично за лінійним законом, що потребує застосування відповідного алгоритму в системі керування тяговим електроприводом.

Автономний транспорт із живленням від паливних елементів ТАБ та іоністори, які зараз використовуються АЕТ як джерела живлення, в основному не можуть конкурувати з ДВЗ за енергоємністю. Пробіг електробусів із ТАБ обмежується 300 – 350 км, електробусів з

іоністорами – до 40 км. Паливні елементи – це той вид джерела енергії для АЕТ, який може забезпечити йому пробіг від однієї заправки воднем на рівні з ДВЗ [12]. У вигляді палива у них використовують водень або метанол.

На сьогодні найперспективнішими типами паливних елементів (ПЕ) вважають: паливні елементи з лужним електролітом, як правило, розчином КОН (ПЕЛЕ); паливні елементи з протонно-обмінними мембранами (ПЕПОМ) з електролітом у вигляді полімеру; паливні елементи з твердооксидними електролітами (ПЕТОЕ) та прямі метанолові паливні елементи (ПМПЕ), де електроліт перебуває у вигляді полімеру чи рідкої кислоти.

Залежно від типу ПЕ, їх ККД є в межах від 30 – 40 % до 45 – 50 %, що значно перевищує ККД теплової генерації на електростанціях. Для використання на транспорті найбільш придатні ПЕЛЕ, ПЕПОМ та ПМПЕ, адже діапазон їх робочих температур становить 50 – 200 °С. Найбільш енергоефективними є ПЕПОМ, які на 1 м² площі реакції дають потужність 3,5 – 6 кВт. Енергоефективність ПМПЕ становить 1,5 – 3,2 кВт/м², а ПЕЛЕ – 2 – 3 кВт/м². Вартість ПЕ трьох типів, окрім ПЕТОЕ, становить близько 200 дол. США в розрахунку на 1 кВт, а у ПЕТОЕ – близько 1500 дол. на 1 кВт. Щодо терміну служби, то у ПЕЛЕ та ПМПЕ він становить до 10 тис. год, у двох інших типів – до 40 тис. год.

Недоліком усіх типів ПЕ є те, що вони при сталій швидкості хімічної реакції продукують сталий за величиною струм. Тому для гасіння пікових навантажень при розгоні транспортного засобу необхідна додаткова буферна батарея – це може бути акумулятор чи батарея іоністорів.

Водневі ПЕ.

Починаючи з кінця 2000-х рр. розробляються конструкції електричних автобусів із водневими ПЕ. Як правило, ємності для зберігання водню в стиснутому або зрідженому стані розміщують на даху таких транспортних засобів [35].

Проблемою розвитку такого транспорту є організація промислового видобутку водню внаслідок електролізу води, що є дуже енергоємним процесом. У разі, якщо електроенергія генерується тепловими електростанціями, екологічна вигода від транспорту на водневих ПЕ вельми сумнівна, оскільки запровадження АЕТ із живленням від ПЕ потребує розвитку альтернативної або ядерної генерації. Крім того, ПЕ потребують удосконалення і здешевлення технології виготовлення, адже для ефективної роботи АЕТ потрібно, щоб вартість

ПЕ знизилася до 100 – 150 дол. США в розрахунку на 1 кВт.

Механічні акумулятори енергії для АЕТ.

Як механічні акумулятори енергії використовувалися маховики з великим моментом інерції мас за рахунок масивного ободу. Такі маховики розміщували під підлогою транспортного засобу у вакуумній камері для зменшення тертя об повітря. Пасажирські транспортні засоби з приводом від маховика були побудовані малими серіями компаніями «Ерлікон» і «General Electric» у 40– 60-х рр. ХХ ст. [20]. На зупинках контактні штанги гіробуса з'єднувалися з мережею змінного трифазного струму. Асинхронний електродвигун розкручував маховик до високої частоти обертання. Під час руху від маховика приводився генератор, який через електричну систему управління приводив ТЕД. Запасу енергії маховика вистачало на пробіг до 9 км, проте дорожні затори завадили розвитку такого виду транспорту – під час зупинки внаслідок тертя маховика об повітря постійно зменшувався запас енергії.

Найефективнішим джерелом живлення для АЕТ на сьогодні є ЛПА, які мають найвищу напругу елемента (3,6 В і вище) і високі показники питомої енергоємності та потужності в розрахунку на одиницю маси та об'єму. Саме тому більшість виробників використовує ЛПА в конструкції електробусів та тролейбусів із АХ. Активні дослідження та вдосконалення технології виготовлення ЛПА забезпечують покращання їх енергетичних характеристик та зниження вартості [36].

ЛПА можна ефективно використовувати як для міських, так і міжміських (на відстані до 200 – 250 км) пасажирських транспортних засобів. На сьогодні провідні виробники виготовляють обладнання (зарядні станції) для швидкої (динамічної) та нічної (статичної) зарядки.

Основний недолік ЛПА та інших типів ТАБ – це відносно невеликий термін служби, який менший за термін служби кузовів та електроприводів. Але, незважаючи на це, літєві ТАБ наразі є найбільш розповсюдженим і перспективним джерелом живлення для АЕТ, включно з тролейбусами з АХ.

Батареї суперконденсаторів.

Перспективним джерелом енергії для міських електробусів і тролейбусів з АХ є батареї суперконденсаторів (іоністорів). Хоча за енергетичними показниками вони досі програють літійіонним ТАБ, їх основна перевага – довговічність. Серійний зразок електробуса БКМ Е321 зі швидкою зарядкою батареї іоністорів має заявлену величину АХ до 40 км, чого достатньо для роботи на міських маршрутах. Проте

батареї іоністорів не можуть бути використані в конструкції міжміського транспорту.

Водневі ПЕ.

Водневі ПЕ забезпечують транспортним засобам пробіг від однієї заправки на рівні з ДВЗ, тому вони можуть використовуватися для транспорту, який працює на міських та міжміських маршрутах. ПЕ є екологічно чистими, а їх ККД є на 45 – 50 % вищий, аніж у ДВЗ. Використання ПЕ як джерел живлення для АЕТ стримується їх високою вартістю, а також проблемами з виробництвом водню в промислових масштабах способом електролізу води [37].

Гібридний транспорт.

Застосування ПЕ на транспорті потребує активного впровадження ядерної й альтернативної енергетики замість теплової генерації. АЕТ із комбінованими силовими установками, що містять ДВЗ, на сьогодні вже морально застарів, оскільки не є екологічно чистим видом транспорту.

В Україні такий транспорт використовується у вигляді тролейбусів із АХ, більшість із яких має лише аварійний АХ від ДГУ. Зараз виробники розглядають комбіновані силові установки, які поєднують ТЕД та ДВЗ в основному для так званих «гібридних автобусів», які є значно економніші, аніж традиційні. Механічні акумулятори енергії – маховики – зараз не використовують у конструкції АЕТ, проте на рівні теоретичних досліджень вони розглядаються як перспективне джерело енергії для міського АЕТ.

1.3 Джерела електричної енергії міського автомобільного транспорту

Стійкий перехід від транспорту з двигунами внутрішнього згоряння до електродвигунів, включаючи поїзди, кораблі та електромобілі. Розширення використання електромобілів (PEV) є дуже перспективним з огляду на можливе зменшення забруднення атмосферного повітря транспортними засобами, насамперед у великих містах.

Протягом останніх кількох років технології гібридного електричного транспортного засобу (HEV) та електричного транспортного засобу (EV) забезпечили ефективне рішення для економії палива з більш високою продуктивністю і більш низькими викидами порівняно зі звичайними транспортними засобами.

Електрифікація автомобільного транспорту в наш час є одним з основних трендів розвитку світової автомобільної галузі. У 2015 р.

частка електромобілів у світовому автопарку складала тільки 0,1 %, але, за прогнозами, до 2030 р. становитиме близько 10 %, а до 2050 р. – близько 40 %.

Ще однією перевагою використання електромобілів є значне зменшення витрат на енергоресурси, а також можливе зменшення витрат на ремонт і технічне обслуговування порівняно зі звичайними автомобілями. Практично у всьому світі електроенергія на сьогодні є найдешевшим енергоресурсом, що застосовується для транспортних засобів. Так, наприклад, електромобілі Tesla на 100 км у середньому споживають 17 кВт·год, у той час як «бензинові» автомобілі в середньому споживають 7 л палива на 100 км. В Україні електроенергія коштує 1,68 грн за 1 кВт·год, а паливо – 1,14 \$ [38].

Тип електромобілів, які мають можливість заряджатися від зовнішніх джерел живлення, називають PEV (plug-in electric vehicle). Вони поділяються на такі типи: - електромобілі, оснащені виключно електричними двигунами (одним чи декількома), що живляться лише від електричних акумуляторів і потребують заряджання від зовнішнього зарядного обладнання (battery electric vehicles) – BEVs; - електромобілі з гібридними енергетичними установками, які оснащені як електричними силовими установками (електродвигунами), так і силовими установками на іншому виді палива (наприклад бензиновими або дизельними двигунами) з різними формами взаємодії силових установок і мають можливість заряджатися від зовнішніх джерел живлення (plug-in hybrid electric vehicles) – PHEVs.

Крім електромобілів PEV, існують, зокрема, електромобілі з гібридними енергетичними установками, які не мають можливості заряджатися від зовнішніх джерел живлення і можуть заряджатися лише від бортового зарядного обладнання (hybrid electric vehicles) – HEVs, а також електромобілі з гібридними енергетичними установками, що працюють на паливних елементах і теж не мають можливості заряджатися від зовнішніх джерел живлення (fuel cell hybrid electric vehicles) – FCHEVs.

Одним з ключових елементів, що визначає перспективи розвитку електромобілів, є акумуляторна батарея. Саме від акумуляторної батареї найбільше залежить, з одного боку, потенційна дальність пересування електромобілів на одному заряджанні, з іншого боку, різниця в ціні з традиційними автомобілями з двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ).

Найбільш поширеним типом батарей для PHEV і BEV в даний час є літій-іонні батареї. Основна причина дорогої ціни електромобіля –

це вартість батареї. Для сучасних електромобілів існує безліч виробництв літій-іонних акумуляторів, більшість з яких знаходяться в стадії розроблення. Дослідники можуть вибрати електроліт, позитивний і негативний електроди, щоб оптимізувати продуктивність, безпеку та довговічність батареї. Батарейний відсік в автомобілі Tesla S має ємність 85 кВт·год і складається з 7104 шт. (16 блоків, у яких знаходиться 6 груп по 74 елементи) літій-іонних батарей виробництва компанії Panasonic типу NCR18650/

Існує тенденція зменшення вартості Li-ion батарей. За існуючими прогнозами, у 2030 р. вартість електромобіля буде меншою, ніж вартість автомобіля з ДВЗ. Заряджання електромобіля зазвичай на 80÷90 % дешевше, ніж заправка бензинових автомобілів. Електромобілі споживають від 16 до 25 кВт·год енергії на 100 км. Залежно від вартості електроенергії 100 км ходу коштуватимуть 10÷30 грн [38].

Літій-іонні акумулятори пошкоджуються при перевищенні певної верхньої межі напруги через виникнення небажаних вторинних електрохімічних реакцій. Також відомо, що подача занадто високого струму може призвести до гальванізації літію на негативному електроді, що у свою чергу призводить до зміни міжфазної фази твердого електроліту та постійно погіршує робочі характеристики батареї.

Швидкість заряджання та розряджання акумулятора визначається C-нормою. Ємність батареї зазвичай оцінюється в 1 C, що означає, що повністю заряджена батарея, розрахована на 1 A·год, повинна забезпечувати 1 A протягом однієї години. Одна й та сама батарея, що не розряджається при 0,5 °C, повинна забезпечувати 500 mA протягом 2 год, а при 2 °C – 2 A протягом 30 хв. Втрати при швидких розрядах скорочують час розряджання, і ці втрати також впливають на час заряджання.

Подальший розвиток технологій і стандартів зарядних пристроїв призведе до поширення електромобілів у суспільстві.

1.4 Акумуляторна тяга рухомого складу залізничного транспорту

Наряду з біопаливом і воднем перспективною альтернативою традиційному дизелю в тязі поїздів є акумуляована електроенергія. В даний час у світі успішно експлуатується велика кількість моделей гібридних тепловозів і електровозів, а провідні машинобудівні компанії активно проводять розробки повністю акумуляторного рухомого складу.



Рисунок 1.1 – Акумуляторний рухомий склад

Акумуляторні технології не такі нові, як може здаватися. Розробки в сфері накопичення електроенергії та її використання на рухомому складі велися ще понад сто років тому. Наприклад, акумулятор-електричний вагон, розроблений компанією винахідника Томаса Едісона, був поставлений у Нову Зеландію ще в 1925 році. Ренесанс акумуляторної тяги в даний час пов'язаний з пошуком екологічно кращої альтернативи викопному паливу заради збереження планети [39].

На користь акумуляторних технологій у порівнянні з воднем свідчить дослідження Німецької асоціації електротехніки, електроніки та інформаційних технологій (VDE). Фахівці підраховали, що за нормативного терміну служби 30 років поїзд з акумуляторним приводом обходиться на 59 млн євро дешевше, ніж залізничний состав на водні. Причини – витрати на кількаразову заміну паливних елементів протягом терміну служби рухомого складу, а також висока вартість водню, одержуваного із застосуванням поновлюваних джерел енергії.

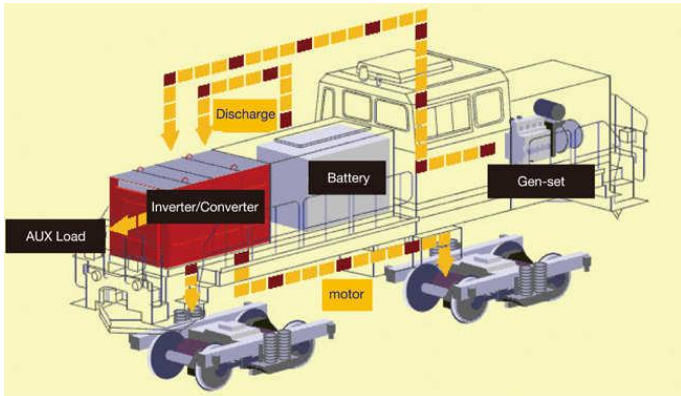


Рисунок 1.2 – Схема роботи гібридного тепловоза

Натомість, виробники вважають, що акумуляторна батарея і воднева силова установка еквівалентні та кожна з них має свої переваги і недоліки залежно від конкретних умов. Крім того, вартість інноваційних поїздів імовірно знижуватиметься із розвитком технологій. Отже провідні європейські постачальники техніки, такі як Alstom і Siemens, в даний час ведуть паралельні розробки.

Як правило, при цьому застосовуються літій-іонні акумулятори.

Альтернатива електрифікації

Йдеться, в першу чергу, про пасажирські поїзди, які працюватимуть під контактним д्रोґом, заряджатимуть від нього акумулятори, а потім використовуватимуть батарею при подальшій поїзді неелектрифікованою дільницею. Це розглядається як альтернатива великим вкладенням в електрифікацію мережі на регіональних лініях.

Ряд німецьких транспортних асоціацій уже замовили подібний рухомий склад. Зокрема, французький виробник Alstom зобов'язався поставити 11 акумуляторних поїздів Coradia Continental для мережі Verkehrsverbund Mittelsachsen до 2023 року. Батареї в них заряджатимуться від контактної лінії, а запас ходу на акумуляторах становить 120 км. Цього достатньо, щоб подолати 80 км неелектрифікованої лінії між Хемніцем і Лейпцигом [40].



Рисунок 1.3 – Alstom Coradia Continental

Інший пасажирський оператор – Landesanstalt Schienenfahrzeuge Baden-Württemberg – також планує з грудня 2023 року запустити акумуляторні поїзди. Для цієї мети постачальник транспортних послуг замовив 20 поїздів Mireo Plus B виробництва концерну Siemens.

Крім того, в транспортній мережі Nahverkehrsverbund Schleswig-Holstein намічено вже з кінця наступного року ввести в експлуатацію 55 вагонів швейцарської компанії Stadler з акумуляторним приводом. Вони, зокрема, забезпечать залізничне сполучення з нульовим рівнем викидів між Кілем і Люнебургом. За інформацією швейцарського виробника, в ході недавнього випробування контактнo-акумуляторний поїзд FLIRT подолав на одній зарядці 185 км.

Проте піонерами у впровадженні акумуляторної тяги є не європейські, а японські виробники. В даний час на острові Кюсю експлуатуються близько двох десятків контактнo-акумуляторних двовагонних поїздів BEC819 EMU під брендом DENCHA (скорочення від «Dual ENergy CHArge train»). Перші з них були введені в комерційну експлуатацію в кінці 2016 року. Виробник – компанія Hitachi. Потяги розвивають швидкість до 120 км/год при роботі під контактнoю лінією змінного струму 20 кВ 60 Гц. Крім того, вони живляться від літій-іонної батареї ємністю 360 кВт·год.



Рисунок 1.4 – Stadler FLIRT Akku



Рисунок 1.5 – Наймасовіший пасажирський потяг на акумуляторах
DENCHA

Ще шість контактних акумуляторних поїздів EV-E801 експлуатуються компанією JR East на півночі країни. Ці двовагонні рейкові автобуси замінюють дизель-поїзди на неелектрифікованих дільницях протяжністю до 26,6 км. При живленні від акумулятора їхня швидкість сягає 85 км/год.

Поряд з контактними акумуляторними на Японських залізницях уже досить давно експлуатуються гібридні дизель-акумуляторні поїзди. Їхні випробування і впровадження в масове виробництво стартували ще в середині 2000-х [41].



Рисунок 1.6 – Перший в світі гібридний дизель-акумуляторний вагон

Перший в світі гібридний дизель-акумуляторний поїзд NE Train (New Energy Train) був спроектований Інститутом технічних досліджень залізниць (RTRI) і поставлений оператору перевезень в 2003 році. Він отримав класифікацію KiYa E991-1. На основі цієї розробки створені серійні поїзди KiYa E200, введені в експлуатацію у 2007-му. Вони оснащені генератором з дизельним двигуном і асинхронним приводом. Крім того, для підзарядки використовується енергія, що виробляється рекуперативним гальмом.

Одним із найсучасніших японських гібридів є потяг UC1 виробництва Kawasaki Heavy Industries. Він надійшов у комерційну експлуатацію в 2020 році.

1.5 Перспективи електрифікації авіаційного транспорту

Перший електричний літак компанії Eviation готується до дебютного польоту. Літак Eviation Alice має максимальну дальність польоту близько 800 км. Нещодавно він пройшов випробування двигуна в північній частині Сіетла. До стартового польоту літака залишилося кілька тижнів, повідомив генеральний менеджер Eviation Омер Бар-Йохай. Компанія Eviation розробила три версії Alice: приміську для перевезення дев'яти пасажирів, представницьку із шістьма пасажирами та вантажну. Перші літаки пасажирської версії компанія почне постачати у 2026 році, розповідає керівник з продажу Джессіка Прус.

На літак вантажної версії також є замовлення. DHL Express замовила минулого року 12 Alice eCargo. Компанія розраховує поставляти їх у 2024 році. Інші аерокосмічні компанії також працюють над виробництвом електричних літаків.

NASA та GE Aviation оголосили у 2021 році про нову дослідницьку співпрацю, метою якої є проведення до середини 2020-х років наземних та льотних випробувань гібридно-електричної силової конструкції мегаваттного (МВт) класу. У планах NASA «Демонстрація польоту з електричним силовим апаратом» (EPFD). Протягом кількох років буде інвестовано 260 млн доларів. Минулого тижня GE Aviation заявила, що обрала Boeing для підтримки льотних випробувань гібридно-електричної силової установки з використанням модифікованого літака Saab 340B та турбогвинтових двигунів СТ7-9В [42].

Виробник авіадвигунів Rolls-Royce повідомив минулого місяця, що його електричний літак Spirit of Innovation офіційно є найшвидшим у світі. Він встановив два нові підтверджені світові рекорди.

На думку аналітиків, до виходу на лінію комерційного пасажирського електричного літака залишилося не менше 10 років. Таку думку висловив CNN Росс Аймер, генеральний менеджер Aero Consulting Experts. «Для цього потрібно, щоб Boeing або Airbus випустили справжній електричний літак».

Суть полягає в тому, що акумуляторну технологію набагато важче вдосконалити у літаках, ніж в автомобілях. Вага батареї зараз є найбільшою працею для електро авіації. Тому електричний літак, який буде здатний перевозити таку ж кількість пасажирів, як і реактивний лайнер, з'явиться нескоро.

Літак на сонячній енергії – експериментальний літак з електросиловою установкою, в якому електродвигуни живляться за рахунок енергії, отримуваної із сонячних елементів, встановлених на фюзеляжі та крилах.

Надлишок електроенергії накопичується в акумуляторних батареях і може використовуватись при частковій або повній нестачі сонячної енергії.

Пілотований одномісний літак «Solar Impulse», побудований за подібною схемою, виконав перший політ 3 грудня 2009 року на авіабазі Дюбендорф (Швейцарія), у червні 2012 цей літак здійснив перший міжконтинентальний переліт довжиною 2500 км [43].

Експериментальний літак Solar Impulse завершив рекордний

переліт 7 червня 2012.

1.6 Сучасні підходи до електрифікації промислового транспорту

Класифікація промислового транспорту

Промисловий транспорт – це виробничий транспорт промислових підприємств, що здійснює переміщення предметів і продуктів праці у сфері виробництва. З одного боку, промисловий транспорт є невід'ємною складовою частиною виробництва, а з іншої – найважливішою ланкою транспорту загального користування.

За територіальною ознакою експлуатації і зв'язку з технологічним процесом виробництва промисловий транспорт розділяється на внутрішній і зовнішній.

У оброблювальній промисловості внутрішній транспорт включає внутрішньоцеховий і міжцеховий, а в добувній – внутрішньошахтний (підземний), транспорт на поверхні і кар'єрний транспорт (при відкритому способі розробки). Внутрішньоцеховий промисловий транспорт є складовою частиною технологічного процесу виробництва, виконуючи в межах цехів переміщення заготовок і вузлів між робітниками місцями, ділянками і відділеннями [44].

Міжцеховим промисловим транспортом, переважно не пов'язаним з технологічним процесом, здійснюються переміщення матеріалів, напівфабрикатів і готових виробів між цехами і складами, розташованими на території підприємства або в одному з них промисловому вузлі. Для сучасних машинобудівних підприємств характерна організація так званого крізного транспорту, об'єднуючого внутрішні і міжцехові переміщення.

Зовнішній промисловий транспорт призначений для доставки на підприємства сировини, палива, матеріалів, устаткування і ін. вантажів, а також для вивозу з території підприємств готової продукції в пункти передачі її на магістральний транспорт або безпосередньо споживачеві.

На промислових підприємствах використовуються різні види транспорту: залізничний, водний, автомобільний, підлоговий безрейковий, конвеєрний, канатно-підвісний, монорельсовий підвісний (канатні і монорельсові дороги) і трубопровідний (гідравлічний транспорт і пневматичний).

Технічну базу промислового транспорту складають: залізничний і автомобільний пересувний склад, плавучі засоби,

підйомно-транспортні і навантажувально-розвантажувальні машини, транспортні будівлі (наприклад, депо, гаражі, ремонтні майстерні), споруди (дороги, дороги, причали, естакади, галереї та інше).

До складу промислового транспорту входять усі види транспорту, що утворюють транспортну систему, а також специфічні види транспорту, але основними є залізничний, автомобільний та трубопровідний транспорт. Специфічні види транспорту відіграють особливу роль. Це, насамперед, транспорт безперервної дії – трубопроводи, конвеєри, канатно-підвісні та монорельсові дороги, пневмо- та гідротранспорт.

Маневри з зарядом

У вантажному русі найпоширеніші на сьогодні гібридні дизель-акумуляторні маневрові тепловози та промислові акумуляторні електровози.

Одним із перших гібридів став локомотив Toshiba HD300 потужністю 500 кВт, що серійно випускається з 2012 року. За результатами тестової експлуатації на вантажному терміналі Токіо було скорочено на 36% споживання палива при роботі з составами середньою масою 700 т. Крім того, зменшено викиди в атмосферу і рівень шуму. Загалом виготовлено понад 30 таких машин [45].



Рисунок 1.7 – Маневровий гібридний тепловоз HD300

Один зі світових лідерів тепловозобудування американська компанія Progress Rail (Caterpillar) планує в поточному році представити повністю акумуляторний локомотив EMD Joule потужністю 3200 к. с.

За інформацією виробника, шестивісний локомотив буде оснащений літій-іонними акумуляторами ємністю 2,4 МВт·год і сучасною електронікою. Час роботи на одній зарядці – до 24 годин. Застосовувати локомотив планується, зокрема, на копальнях у Південній Африці.

Здійснює випробування потужного гібридного тепловоза в Каліфорнії інший гігант локомотивобудування США – Wabtec (до складу якого входить GE Transportation).

Крім того, кілька моделей гібридних вантажних локомотивів для європейського ринку розробила китайська корпорація CRRC. У їхньому числі – воднево-акумуляторний тяговий рухомий склад.

Розробки акумуляторних вантажних локомотивів активно ведуться також у Польщі, Чехії та інших країнах.

Ряд промислових моделей доступні вже сьогодні. Як приклад можна привести продукцію Express Service OOD – провідного підприємства Болгарії з будівництва та обслуговування локомотивів. Компанія з 2005 року пропонує лінійку повністю акумуляторних транспортних засобів з номінальним навантаженням до 3 тис. т (модель ES3000). Дані локомотиви дозволяють економити значні кошти за рахунок відмови від закупівель дизпалива і можуть застосовуватися для маневрів на території ремонтних депо, промислових підприємств і терміналів. Вони експлуатуються більше ніж в 20 країнах на 4 континентах [46].



Рисунок 1.8 – Акумуляторний рухомий склад в дії ES1000.

Варто відзначити, що акумуляторні технології – одні з найперспективніших в умовах України. За розрахунками фахівців Укрзалізниці, використання електроенергії в тязі поїздів в 6 разів дешевше дизельного палива.



Рисунок 1.9 – ES3000 акумуляторний маневровий локомотив

Електроенергія в основному генерується в країні, а не імпортується, як нафтопродукти. Крім того, Україна має досвід виробництва (у радянський період), експлуатації та ремонту акумуляторних локомотивів.

CRRC здійснила модернізацію тепловоза для використання водневої тяги

Китайська компанія CRRC вперше здійснила модернізацію тепловоза для використання водневої тяги, інформує залізничний журнал **Railway Supply**.

Модернізацію, що супроводжується продовженням терміну служби, було проведено на заводі в Датуні протягом двох років.

Турецька компанія Arkas планує розвивати залізничний контейнерний сервіс до Дуйсбурга

Тепловоз, названий Ningdong, оснащений 800-кіловатним водневим двигуном із запасом ходу до 190 годин.

За словами заступника генерального директора заводу Лян Чженьчжуна, на даний момент він є найпотужнішим водневим локомотивом у світі.



Рисунок 1.10 – Тепловоза для використання водневої тяги

COSCO та NHLA підписали угоду про пайову участь у гамбурзькому контейнерному терміналі

Його тягова система сумісна з різними типами акумуляторів. Об'єм бака для зберігання водню становить 270 кг, а час заправки займає дві години.

Особлива увага приділяється заходам безпеки. Так, у тепловоза Ningdong встановлені системи моніторингу та блокування, а також протипожежна перегородка між водневим баком, кабіною машиніста та електрощитом.

На даний час у Китаї експлуатується понад 7,8 тисячі тепловозів.

Як заявляє компанія CRRC, цей проект підходить для модернізації 90% з них.

Раніше у 2021 році компанія представила свій перший маневровий локомотив, що працює на водневих та акумуляторних батареях потужністю 700 кВт.

Компанія CRRC Corporation Limited (CRRC) є китайською державною компанією і одним з найбільших виробників рухомого складу та залізничного обладнання в світі. Вона була створена в 2015 році шляхом об'єднання двох основних виробників локомотивів та рухомого складу в Китаї – China CNR Corporation і CSR Corporation Limited.

CRRC спеціалізується на проектуванні, розробці, виробництві та обслуговуванні широкого спектру залізничного транспортного обладнання, включаючи локомотиви, поїзди високої швидкості, метропоїзди, легкі транспортні засоби, пасажирські вагони, вантажні вагони та пов'язані компоненти та системи. Компанія працює в різних сегментах залізничної галузі, включаючи міський швидкісний транзит, міжміський та регіональний транспорт та вантажний транспорт.

Як глобальний лідер у залізничній галузі, CRRC має значну присутність як в Китаї, так і за кордоном. Компанія має виробничі підприємства та дослідні центри по всій Китаї, а також в інших країнах, таких як Сполучені Штати, Німеччина, Бразилія, Австралія та Південна Африка. Вона постачає рухомий склад та залізничне обладнання в багато країн світу, сприяючи розвитку залізничної інфраструктури у всьому світі.

Технологічний шахтний транспорт

Як відомо, акумуляторні електровози призначені для транспортування вагонеток з корисними копалинами, породою, допоміжними матеріалами, а також для перевезення людей за головними та допоміжними відкатними гірничими виробками шахт, небезпечних по газу або пилу. До акумуляторних електровозів висуваються вимоги Правил безпеки щодо застосування електровозів підвищеної надійності (РП) або вибухобезпечних (РВ). Одним із дорогих вузлів шахтного локомотива є акумуляторні батареї, які мають обмеження циклів заряду-розряду їх елементів.

Шахтні акумуляторні електровози, як правило, комплектуються електрообладнанням з рівнем вибухозахищеності РВ (рудничне вибухобезпечне), проте через застосування акумуляторної батареї дані електровози відносять до класу безпеки РП (рудничні підвищеної надійності) [48]. Шахтні акумуляторні електровози у виконанні РП застосовуються [49]: – у відкатних виробках шахт I та II категорій щодо газу або небезпечних по пилу; – у відкатних виробках зі свіжим струменем повітря шахт III категорії та надкатегорійних по газу; - у відкатних виробках зі свіжим струменем повітря на пластах, не небезпечних за раптовими викидами, та на шахтах, небезпечних за раптовими викидами.

Шахтні акумуляторні електровози у виконанні РВ застосовуються: – у відкатних виробках шахт, небезпечних по газу чи пилу; – у виробках шахт із вихідним струменем повітря та тупикових, що провітрюються вентиляторами місцевого провітрювання; – на шахтах III категорії, надкатегорійних щодо газу та небезпечних за

раптовими викидами. На даний момент поширені електровози зі зчіпною масою 7,1; 10,19; 14,27; 28,5 т, що мають позначення АРП7; АРВ; АРП10; АРП; АРП14; АРП28; АРП8 [49]. Також на гірничодобувних підприємствах застосовуються локомотиви серії 4,5 АРП; 5АРВ; АМ8Д; 2АМ8Д; АК2У.

На даний момент в ролі тягових акумуляторів електрорухомого складу актуальним є застосування нових електрохімічних систем, а саме літій-іонних, фторид-іонних, полімерних. Розроблено акумуляторні тролейвози та підземні вантажно-доставні машини для вугільних розрізів, копалень та шахт з використанням цих акумуляторів.

При застосуванні рідинних електрохімічних систем як тягові акумуляторні батареї виникає завдання відведення газів, що виділяються в процесі зарядки. У режимі гальмування акумуляторного електровоза електричний привід перетворюється на генераторний режим, тобто виконується рекуперация і акумуляторна батарея перетворюється на режим зарядки. Як описано раніше, у процесі зарядки свинцево-кислотних та лужних батарей відбувається виділення водню. Воднево-повітряна суміш є вибухонебезпечною, що вимагає додаткової вибухозахищеності акумуляторного відсіку та його вентиляції.

Електричний кар'єрний автотранспорт

Дослідження та досвідчені випробування дозволили встановити, що серійний електромотор є найперспективнішою основою для електричного приводу, особливо у сфері тягових завдань. Він має певні механічні характеристики, які роблять його найбільш підходящим для використання у важкому транспорті, включаючи кар'єрні роботи. Цей тип приводу, застосований у кар'єрних самоскидах та іншій техніці, сприяв зростанню та розвитку виробництва тягових електромоторів як самостійної галузі машинобудування.

Саме завдяки розробці таких потужних електродвигунів, потужність яких досягала 700 кВт, вдалося значно збільшити вантажопідйомність кар'єрної техніки до 220 тонн. Ця цифра, яка ще недавно здавалася фантастичною, стала реальністю. На сьогоднішній день більше половини обсягів гірничого матеріалу, що перевозиться, на підприємствах гірничодобувної галузі у світі здійснюється за допомогою кар'єрних самоскидів, оснащених електромоторами. Цей тип техніки широко застосовується в кар'єрах, де з різних причин неможливе використання іншої спеціалізованої техніки.



Рисунок 1.11 – Робота автотранспорту у кар'єрі

Сьогодні ніхто не сумнівається в обґрунтованості та економічній вигоді впровадження змінного струму в конструкцію сучасних кар'єрних самоскидів із вантажопідйомністю понад 250 тонн. Використання електроприводу у поєднанні з комп'ютерними технологіями керування дозволяє значно підвищити продуктивність техніки та досягти максимального рівня безпеки під час експлуатації таких великогабаритних спеціальних транспортних засобів.

Електропривод забезпечує більш ефективну передачу енергії та потужності, що дозволяє кар'єрним самоскидам справлятися з великими навантаженнями та покращує їхню загальну продуктивність. Комп'ютерні системи управління дозволяють точно контролювати роботу самоскидів, оптимізувати їх рух та підвищити ефективність операцій у кар'єрі.

Важливим аспектом застосування електроприводу у кар'єрних самоскидах є підвищення безпеки. Електронні системи контролю та управління дозволяють виявляти потенційні проблеми та запобігати аварійним ситуаціям. Завдяки цьому досягається більш надійна та безпечна експлуатація кар'єрних самоскидів [50].

Електричний самоскид eDumper

Кар'єрний самоскид eDumper на електротязі – це інноваційний транспортний засіб, призначений для використання в кар'єрах та гірничодобувній промисловості. Він оснащений електричним приводом, що робить його екологічно чистим та енергоефективним.

eDumper має вражаючу вантажопідйомність та здатний перевозити великі обсяги гірської маси. Його електричний привід дозволяє досягти високої продуктивності та економії палива. Крім того, він має просунуті технології управління, що забезпечує точне управління та оптимізацію роботи в різних умовах.



Рисунок 1.12 – Електричний самоскид edumper

Особливістю eDumper є його здатність рекуперувати енергію під час спуску з гори. Під час спуску самоскид перетворює кінетичну енергію на електричну і заряджає свої акумулятори. Це дозволяє знизити енергоспоживання та підвищити ефективність використання.



Рисунок 1.13 – Електричний самоскид eDumper

Електросамоскид eDumper вагою 45 тонн почав експлуатуватися у Швейцарії. Ця потужна вантажівка призначена для перевезення 65 тонн породи з крутого схилу гори по дорозі з ухилом 13% до цементного заводу.



Рисунок 1.14 – eDumper компанії Kuhn Schweitz AG на базі кар'єрної вантажівки Komatsu HB 605-7

eDumper був розроблений компанією Kuhn Schweitz AG на базі кар'єрної вантажівки Komatsu HB 605-7. Самоскид має довжину 9 метрів, а його ширина та висота становлять 4,2 метра. При піднятому кузові він сягає висоти 8,5 метра. Для живлення використовуються батареї ємністю 600 кВт•год, які важать 4,5 тонни та в шість разів перевищують ємність акумуляторів Tesla Model S.

Дивним фактом є те, що під час спуску маса самоскида збільшується більш ніж удвічі. Завдяки цій інерції рекуперативна система гальмування може накопичувати більше енергії в акумуляторах, ніж необхідно для зворотного сходження порожнього eDumper. Завдяки цій системі зарядки акумуляторів, eDumper може заощадити до 50 тонн дизельного палива на рік та знизити вуглецевий слід на 1,3 мільйона кілограмів.

БЕЛАЗ на електротязі

Білоруські машинобудівники не відстають від своїх західних колег. Влітку 2020 року з'явилася новина про створення гігантського кар'єрного самоскида "БелАЗ-75710", який стане найпотужнішою вантажівкою у світі. Його вантажопідйомність становитиме 450 тонн. Машина розроблена на автомобільному заводі в Жодино і скоро використовуватиметься на кар'єрах не лише в Білорусі, а й за її межами. Попередником цієї моделі був "слабший" варіант з вантажопідйомністю 90 тонн.



Рисунок 1.15 – Електросамоскид “БелАЗ-75710”

Електросамоскид “БелАЗ-75710” має низку незаперечних переваг. Насамперед він повністю позбавлений шкідливих викидів в атмосферу і дозволяє суттєво скоротити витрати на паливо. Експерти підраховали, що за 10 років використання цього транспортного засобу кар’єри зможуть заощадити щонайменше 3 мільйони доларів. “БелАЗ-75710”, який вже був охрещений монстром на Заході, оснащений гібридним дизельно-електричним двигуном. Його потужність у 6 разів перевищує потужність найпотужнішого гоночного боліда.

Розробники цього гіганта запровадили низку нестандартних рішень для максимального збільшення вантажопідйомності. Кузов кар’єрного самоскида має продуману форму, що покращує аеродинамічні характеристики. Електричний БелАЗ оснащений 8 колісними парами, тоді як раніше найбільша великогабаритна спецтехніка мала не більше 6 пар коліс. Безкамерні покришки витримують тиск 102 тонни. Вага гіганта без вантажу складає 350 тонн.

Для живлення самоскида передбачені два 16-циліндрові дизельні двигуни, які запускають генератори. Генератори забезпечують електроенергію до роботи 4-х електромоторів. Крутний момент досягає 18,626 Нм, а загальна потужність всіх двигунів складає 4600 кінських сил.



Рисунок 1.16 – Електросамоскид “БелАЗ-75710”

Електричний кар'єрний самоскид caterpillar

Компанія Caterpillar успішно провела випробування електричного кар'єрного самоскида 793 Electric, демонструючи його потенціал як альтернативу водневим технологіям. Випробування проводилися на полігоні в Тусоні, Арізона, де Caterpillar інвестує у розвиток електричних кар'єрних самоскидів та вдосконалення випробувального полігону [51].



Рисунок 1.17 – Електросамоскид 793 Electric

У ході демонстрації електричного кар'єрного самоскида 793 Electric його кузов було заповнено рудою. Самоскид, повністю завантажений на електротязі, розвинув максимальну швидкість 60 км/год та успішно проїхав кілометр під ухилом 10% зі швидкістю 12 км/год. Потім самоскид спустився вниз схилом, продемонструвавши можливості рекуперації енергії. Після закінчення циклу у самоскида залишився запас енергії в тяговій батареї, достатній для подальшої роботи. У процесі випробувань розробники контролювали понад 1100 різних параметрів для подальшого інженерного моделювання.

В даний час модель 793 Electric є прототипом, але Caterpillar натякає на наступне випуск серійних електричних вантажівок, включаючи системи автономного водіння. У програмі електрифікації кар'єрних самоскидів беруть участь такі компанії, як BHP, Freeport-McMoRan, Newmont Corporation, Rio Tinto та Teck Resources Limited.

Програма Early Learner, запущена в 2021 році, спрямована на прискорення розробки та випробування акумуляторних вантажівок Caterpillar на об'єктах клієнтів. Вона дозволяє компанії вже співпрацювати зі своїми партнерами і разом скорочувати шкідливі викиди, підтверджуючи їхню відданість екологічній стійкості.

Кар'єрний самоскид komatsu на електротязі

Кар'єрні самоскиди Komatsu є одними з найбільш відомих і широко використовуються в будівельній та гірничодобувній промисловості. Компанія Komatsu, що є одним із провідних виробників будівельної та гірничодобувної техніки, пропонує широкий асортимент самоскидів для роботи в кар'єрах.

Одна з найпопулярніших моделей кар'єрних самоскидів від Komatsu – це модель HD785. Цей самоскид має вантажопідйомність близько 91 тонни і має високу продуктивність і надійність. Він оснащений потужним двигуном та надійною системою передач, що дозволяє йому ефективно працювати у важких умовах кар'єрів.

Важливими характеристиками кар'єрних самоскидів Komatsu є їхня місткість, стійкість і чудова маневреність. Вони мають великий обсяг кузова, що дозволяє перевозити великі обсяги гірської маси або матеріалів. Крім того, ці самоскиди обладнані спеціальними системами управління, які забезпечують стійкість під час руху нерівною місцевістю [52].



Рисунок 1.18 – Електросамоскид HD785



Рисунок 1.19 – Електросамоскид HD785

Компанія Komatsu також приділяє увагу ефективності використання палива та зниженню викидів шкідливих речовин. Багато моделей кар'єрних самоскидів Komatsu оснащені сучасними системами

керування двигуном, які сприяють економії палива та зниженню негативного впливу на навколишнє середовище.

Загалом кар'єрні самоскиди Komatsu є надійними та ефективними машинами, здатними справлятися з важкими завданнями в кар'єрах. Вони являють собою важливий засіб для перевезення матеріалів та гірничої маси, забезпечуючи збільшення продуктивності та скорочення часу виконання робіт у будівельній та гірничодобувній галузях.

Кар'єрний самоскид на електротязі еріос mt65

Еріос MT65 – це кар'єрний електричний самоскид виробництва компанії Еріос. Він має вантажопідйомність близько 65 тонн і призначений для використання у будівництві та гірничодобувній промисловості.



Рисунок 1.20 – Електросамоскид Еріос MT65

MT65 має компактні розміри, що робить його зручним для роботи в обмежених просторах кар'єрах. Він оснащений електричною системою живлення, що дозволяє знизити викиди шкідливих речовин та шумове забруднення.

Кар'єрний самоскид Еріос MT65 пропонує високу продуктивність та ефективність роботи. Він здатний перевозити більші обсяги гірничої маси чи матеріалів на значні відстані. Надійність та міцність цієї моделі забезпечують тривалий термін служби та мінімальні простой.



Рисунок 1.21 – Електросамоскид Еріос МТ65 у підземних умовах праці

MT65 обладнаний інноваційними системами управління та моніторингу, які забезпечують точність та безпеку при експлуатації. Він також має функції, що дозволяють оптимізувати енергоспоживання та знизити загальну вартість володіння.

Еріос МТ65 – це сучасний кар'єрний електричний самоскид, який поєднує у собі високу продуктивність, екологічну ефективність та надійність. Він є важливим інструментом для виконання завдань у кар'єрах, забезпечуючи ефективне та безпечне перевезення матеріалів.

XCMG ET110

XCMG ET110 – це кар'єрний електричний самоскид виробництва компанії XCMG. Він має вантажопідйомність близько 110 тон і призначений для використання у гірничодобувній та будівельній промисловості.

ET110 має потужну електричну систему, яка забезпечує високу продуктивність і надійність роботи. Він здатний ефективно перевозити великі обсяги гірничої маси чи будівельних матеріалів на далекі відстані.

Кар'єрний самоскид XCMG ET110 оснащений передовими технологіями управління та моніторингу, що забезпечує точність та безпеку при експлуатації. Він також має функції енергозбереження, які дозволяють знизити споживання електроенергії та операційні витрати.

ET110 пропонує міцну конструкцію та високу маневреність, що робить його придатним для роботи у складних умовах кар'єрів. Він також має надійну систему гальмування та управління, забезпечуючи безпеку та контроль під час руху.



Рисунок 1.22 – Кар'єрний електросамоскид XCMG ET110

XCMG ET110 – це сучасний та ефективний кар'єрний електричний самоскид, який відрізняється високою продуктивністю, економічністю та надійністю. Він допомагає оптимізувати робочі процеси в кар'єрах, забезпечуючи ефективне перевезення матеріалів та підвищення продуктивності.

У Китаї поставлено черговий рекорд гігантоманії. Для майбутньої безвуглецевої економіки випущено найбільший у світі кар'єрний самоскид, який працює виключно на акумуляторному харчуванні. Повного заряду батареї вистачає на 8-годинний робочий день, а вантажопідйомність сягає 120 тонн [54].

Переведення на батарейне живлення кожного такого кар'єрного самоскида дозволить знизити викиди вуглекислого газу в атмосферу на рівні 1500 тонн на рік. Також знижуються енергетичні витрати на роботу важкої техніки – на 50%, за словами виробника. Нарешті, обслуговування та ремонт електричних агрегатів простіше і дешевше за паливні. У цьому випадку, наприклад, виробник обіцяє 20% зниження витрат

Виробником батарейного блоку 120-тонного самоскида компанії Xiangtan Electric Manufacturing Group названо китайську CATL. Це літій-залізо-фосфатний акумулятор, ємність якого поки що не розкривається. Вбудована в батарею система терморегулювання дозволить експлуатувати техніку за будь-яких погодних умов у діапазоні температур від -30 °C до 60 °C. Батарея повністю захищена від попадання пилу та вологи, що гарантується підтвердженням стандарту IP68. Вбудована електроніка точно відстежує рівень заряду і не

дозволить техніці розрядитись у випадковий час. Такий на заправку не відкотиш, якщо батарея розрядиться десь на маршруті.

Початок експлуатації самоскида на видобувному підприємстві розпочнеться наступного 2023 року.



Рисунок 1.23 – Карьерний електросамоскид на батарейному живленні



Рисисунок 1.24 – Батарея живлення

Безпілотний електричний кар'єрний самоскид



Рисунок 1.25 – Безпілотний кар'єрний електросамоскид

Безпілотний тренд потроху сягає сфери будівництва. Китайський концерн XCMG випустив безпілотний електричний самоскид, яким можна як керувати дистанційно, так і надати йому свободу дій і працюватиме в автономному режимі, під керуванням ІІ [55].

Вантажівка оснащена візуальними та акустичними датчиками, лазерним радаром, радаром міліметрового діапазону та камерами для сканування робочого середовища та складання віртуальної топографічної карти.

У режимі дистанційного керування самоскид використовує датчик для надсилання інформації назад оператору за допомогою технології 5G.

При переключенні в повністю автономний режим керування транспортним засобом перейде до технології штучного інтелекту, яка визначає пункт призначення та планує маршрути відповідно до графіка видобутку на шахті. Самоскид координуватиме свою роботу з іншим обладнанням незалежно від автоматизації.

У разі виникнення перешкод штучний інтелект проведе оцінку безпеки і автоматично вирішить, куди перенаправити транспортний засіб.

Як тільки транспортний засіб досягає пункту призначення, він визначає найкраще місце для паркування для навантаження. Після

завантаження самоскид скидає свою навігаційну мету та переходить до наступного пункту.

Акумулятор XDR80TE-AT великої ємності потужністю 500 кВт/год можна зарядити протягом 8-10 годин, або замінити на інший, всього за 6 хвилин, для забезпечення безперебійної роботи.

Контрольні питання до розділу 1

1. Які є актуальні питання енергетики?
2. Які на сьогоднішній день експлуатуються типи накопичувачів енергії?
3. Які в перспективі технології накопичувачів енергії можуть бути реалізовані?
4. Який принцип дії паливних елементів?
5. Охарактеризуйте концепцію Smart Grid?
6. Які перспективи впровадження сучасних технологій електрифікації транспорту?

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО НАКОПИЧУВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

2.1 Поняття та класифікація систем накопичення електричної енергії для транспортних засобів

Електричний акумулятор (від лат. *accumulare* – «нагромаджувати») – хімічне джерело електричного струму багаторазової дії, основна специфіка якого полягає в зворотності внутрішніх хімічних процесів, що забезпечує його багаторазове циклічне використання (через заряд-розряд) для накопичення електричної енергії та автономного електроживлення різноманітних електротехнічних пристроїв та систем. Електричний акумулятор належить до категорії вторинних хімічних джерел струму [12-40].

Принцип дії акумулятора заснований на зворотності хімічної реакції. Найпоширеніші електричні (кислотні та лужні) акумулятори накопичують хімічну енергію (внаслідок зворотних хімічних реакцій між речовиною електродів та електролітом), і віддають електричну енергію, будучи гальванічними елементами. Працездатність акумулятора може бути відновлена шляхом заряду, тобто пропусканням електричного струму в напрямку, зворотному напрямку струму при розряді: на від'ємному електроді (катоді) реакція окиснення замінюється реакцією відновлення, а на позитивному електроді (аноді) реакція відновлення змінюється на реакцію окиснення [12-40].

Ємність акумулятора – це максимально можливий корисний заряд, що віддається повністю зарядженим акумулятором при розряді до найменшої допустимої напруги.

В міжнародній системі одиниць СІ ємність акумуляторів вимірюють в кулонах. На практиці використовується позасистемна одиниця Ампер-година: $1 \text{ А} \cdot \text{год} = 3600 \text{ Кл}$.

Енергетична ємність – енергія, що віддається повністю зарядженим акумулятором при розряді до найменшої допустимої напруги.

В системі СІ енергетична ємність вимірюється в джоулях. На практиці використовується позасистемна одиниця Ват-година: $1 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 3600 \text{ Дж}$.

Розрізняють кислотні (свинцеві) і лужні акумулятори.

Кислотні акумулятори мають високу номінальну напругу (2 В), малий внутрішній електричний опір та відносно високий коефіцієнт корисної дії (до 0.85). Проте невеликий термін служби, недостатня

ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ, НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ
ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

міцність та незадовільна робота при низьких і високих температурах обмежують їх застосування.

Лужні акумулятори мають ряд переваг перед кислотними: вони міцніші, не бояться перевантажень, добре працюють в широкому інтервалі температур, невимогливі до виробничих умов. Основні їх недоліки: низький ККД (до 60 %) і напруга (1,2; 1,25; 1,33 В) [12-40].

Таблиця 2.1 – Характеристики акумуляторів

Тип	Напруга	Щільність енергії			Потужність	ККД	Е/\$	Розряд.	Кількість циклів	Тривалість використання (років)
	(В)	(МДж/кг)	(Вт·г/кг)	(Вт·г/л)	(Вт/кг)	(%)	(Вт·г/\$)	(%/міс.)		
Лужно-кислотний	2.1	0.11-0.14	30-40	60-75	180	70-92	5-8	3-4	500-800	3 (автомобільний акумулятор), 20 (стаціонарний)
VRLA	2.105									
Лужний	1.5	0.31	85	250	50	99.9	7.7	<0.3	100-1000	<5
Ni-залізо	1.2	0.18	50		100	65	5-7.3	20-40		50+
Ni-кадмій	1.2	0.14-0.22	40-60	50-150	150	70-90		20	1500	
NiH ₂	1.5		75						20000	15+
NiMH	1.2	0.11-0.29	30-80	140-300	250-1000	66	1.37	20	1000	
Ni-цинк	1.7	0.22	60	170	900		2-3.3		100-500	
Li-іонний	3.6	0.58	160	270	1800	99.9	2.8-5	5-10	1200	2-3
Тонкоплівчастий Li	-			350	959	-	„P		40000	
ZnBr			75-85							
V-редокс	1.4-1.6		25-35			96			14000	10 (стаціонарний)
NaS	2	0.54	150			89-92			2500-4500	
Розплавлена сіль			70-110		150-220		4.54		3000+	8+
Супер залізо										
Срібло-цинк			130	240						

На- іонний	3.6		до 400						2000	
---------------	-----	--	--------	--	--	--	--	--	------	--

До VRLA або рекомбінантів належать гелеві акумулятори та абсорбційні скляні пластинки.

За складом електродів (активної маси) лужні акумулятори поділяють на:

- Кадмій-нікелеві;
- Залізо-нікелеві;
- Цинк-нікелеві;
- Срібло-цинкові.

За способом утримання електродів акумулятори поділяють на:

– Ламельні (у них активна маса поміщена у ламелі. У залізо-нікелевих акумуляторах ламелями є плоскі сталеві коробочки з перфорованими стінками);

- Безламельні.

Безламельні акумулятори мають підвищену ємність і менші розміри. Останнім часом почали застосовувати стартерні залізо-нікельові акумулятори, які працюють при низьких температурах краще, ніж кислотні. Для одержання великих імпульсних струмів при низьких і високих температурах та значних змінах атмосферного тиску застосовують срібло-цинкові акумулятори.

Кадмійо-нікельові акумулятори можуть бути дуже малих розмірів – 1–3 см², їх застосовують у слухових апаратах для глухих та в напівпровідникових радіоприладах. Лужні акумулятори виробляють сухими.

Електричні та експлуатаційні характеристики акумулятора залежать від матеріалу електродів і складу електроліту.

Види акумуляування енергії [12-40]:

- зберігання викопного палива;
- механічне (пневматичний акумулятор; безтопковий паровоз; супермаховик; гравітаційна потенціальна енергія; гідроакумулятор; гідроакумулявальна електростанція);
- електричний, електромагнітний (конденсатор; суперконденсатор; надпровідниковий магнітний акумулятор (надпровідникові магніти і надпровідні котушки (H01F6));
- біологічний (глікоген; крохмаль);
- електрохімічний (проточний акумулятор; акумуляторна батарея; UltraBattery);

– тепловий (акумулятор тепла; криогенні системи зберігання, акумулявання енергії зрідженим повітрям (LAES); криогенний двигун Дермана; евтектична система; акумулятор холоду; фазовий перехід речовини; сезонне зберігання теплової енергії; сонячний ставок; паровий акумулятор; зберігання теплової енергії);

– хімічний (біопаливо; гідратовані солі; зберігання водню; перекис водню; технологія Power-to-Gas (P2G); оксид ванадію(V)).

Електрохімічний

Акумуляторна батарея

Акумуляторні батареї мають нижчі загальну вартість використання і рівень впливу на навколишнє середовище, ніж неперезаряджувані (одноразові) батареї. Акумуляторні батареї деяких типів доступні в тих самих форматах, що й одноразові. Акумуляторні мають вищу початкову вартість, але їх можна дуже дешево перезаряджати і використовувати багато разів.

Загальний хімічний склад акумуляторних батарей [20-50]:

– Проточна батарея працює, пропускаючи розчин через мембрану, де відбувається обмін іонів для заряджання/розряджання елемента. Напруга струму хімічно визначена рівнянням Нернста, і на практиці становить від 1,0 до 2,2 В. Ємність накопичувача залежить від об'єму ємностей, в яких знаходиться розчин.

– Свинцево-кислотні акумулятори: свинцево-кислотні акумулятори займають найбільшу частку ринку акумуляторів. У зарядженому стані від'ємний електрод з металевого свинцю і додатний електрод з сульфату свинцю занурюють в електроліт з розведеної сульфатної кислоти (H_2SO_4). В процесі розряду електрони виштовхуються з комірки, оскільки на від'ємному електроді утворюється сульфат свинцю, а електроліт відновлюється до води.

– Технологія свинцево-кислотних акумуляторів широко розвинулась. Експлуатація вимагає невеликих затрат праці, вартість низька. Доступна енергетична ємність батареї схильна до швидкого розряджання, що призводить до малого терміну служби і низької щільності енергії.

– Нікель-кадмієва батарея (NiCd): як електроди використовуються гідрат оксиду нікелю і металевий кадмій. Кадмій є токсичним елементом й у 2004 році був заборонений Європейським союзом для більшості видів використання. Нікель-кадмієві батареї були майже повністю замінені нікель-металогідридними (NiMH).

– Нікель-металогідридна батарея (NiMH): перші комерційні зразки з'явилися в 1989 році. Зараз це звичайний споживчий і

промисловий товар. Замість кадмію в ній для від'ємного електрода використано воднепоглинальний сплав.

– Літій-іонна акумуляторна батарея: вибір багатьох споживачів у сфері електронних пристроїв. Має одне з кращих співвідношень енергії до маси і дуже повільний саморозряд, коли не використовується.

– Літій-іонний полімерний акумулятор: ці акумулятори мають малу вагу і можуть бути виготовлені будь-якої форми.

Суперконденсатор

Суперконденсатори, також звані електричними двошаровими конденсаторами або ультраконденсаторами, є загальною назвою для сімейства електрохімічних конденсаторів, які не мають звичайних твердих діелектриків. Ємність визначається двома параметрами акумуляції: двошарова ємність і псевдоємність.

Суперконденсатори підтримують широкий спектр застосувань, зокрема: суперконденсатори ліквідують розрив між звичайними конденсаторами і акумуляторними батареями. Вони зберігають найбільшу кількість енергії на одиницю об'єму або маси (густина енергії) серед конденсаторів. Ємність досягає 10 000 фарад/1,2 В, до 10 000 разів більше, ніж в електролітичних конденсаторів, але видають або приймають менше половини потужності за одиницю часу (густина потужності).

У той час, як суперконденсатори мають питому енергію і питому густину енергії приблизно 10 % у порівнянні з батареями, їх щільність потужності зазвичай в 10-100 разів більша. Це призводить до значно коротших циклів заряджання/розряджання. Крім того, вони витримують значно більше циклів заряджання і розряджання, ніж батареї.

Ефект пам'яті акумулятора – в даний момент під ефектом пам'яті розуміється зворотна втрата ємності, що має місце в деяких типах електричних акумуляторів при порушенні рекомендованого режиму зарядки, зокрема, при зарядці не повністю розрядженого акумулятора. Назва пов'язана з зовнішнім проявом ефекту: акумулятор начебто «пам'ятає», що в попередні цикли роботи його ємність не була використана повністю, і при розряді віддає тільки до «запам'ятованої межі».

Таблиця 2.2 – Групування за типами батарей

Первинні батареї	Вторинні батареї
Вугільно-цинкова батарея або сольова марганцево-цинкова батарея Zinc-carbon battery	Свинцево-кислотні акумулятори Lead-acid battery – Гелеві акумулятори – VRLA-батареї – Батареї глибокого заряду-розряду
Хлор-цинкова батарея Zinc chloride battery	Акумуляторні лужні батареї Rechargeable alkaline battery
Лужна марганцево-цинкова батарея або лужна батарея Alkaline battery	Нікель-кадмієві акумуляторні батареї Nickel-cadmium battery
Ртутна батарея Mercury battery – Ртутно-цинкова батарея – Ртутно-індієва батарея – Ртутно-титанова батарея – Цинк-двоокиссульфатно-ртутна суха батарея	Нікель-метал-гідридні акумулятори Nickel metal hydride battery
Срібло-цинкові батареї Silver-oxide battery	Срібло-цинкові акумулятори
Літієва батарея Lithium battery у тому числі: – Літій-тіонілхлорид (LiSOCl_2) – Літій-п'ятиокис ванадію (LiV_2O_5) – Літій-двоокис сірки (LiSO_2) – Літій-трёхокис молібдену (LiMoO_3) – Літій-фторид міді (CuF_2) – Літій-хромат срібла ($\text{LiAg}_2\text{CrO}_4$) – Літій-сульфід міді (LiCuS)	Літій-іонний акумулятор
Цинк-повітряна батарея Zinc-air batteries	Літій-полімерний акумулятор
Комірки Кларка Clark cell	Залізо-нікелевий акумулятор
Комірка Бунзена Bunsen cell	Натрієво-сірчаний акумулятор
Комірки Данієля Daniell cell	
Комірки Гальвані Galvanic cell	
Комірки Лекланше Leclanché cell	
Комірки Вестона Weston cell	

ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ, НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ
ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Вольтів стовп Voltaic pile	
Високотемпературні резервні термічно-активовувані батареї	
Водо-активовувані батареї Water-activated battery	
Аміачні резервні батареї	
Картопляна батарея Potato battery	
Лимонна батарея Lemon battery	
Атомна батарея Atomic battery Ядерна мікро-батарея або радіонуклідна мікро-батарея Nuclear micro-battery	
Батареї щодо застосування	
Резервний акумулятор	
Водо-активовувані батареї	
Стартерний автомобільний акумулятор	
Акумулятор електричного транспортного засобу	

Наведені в цій таблиці елементи живлення є складовими гальванічних елементів або акумуляторів, і мають номінальну напругу залежно від електрохімічних параметрів активних компонентів:

- 1,55 В для срібно-цинкових елементів;
- 1,5 В для марганцево-цинкових елементів;
- 1,4 В для повітряно-цинкових елементів;
- 1,2 В для нікель-кадмієвих і нікель-метал-гідридних елементів.

Таблиця 2.3 – Позначення акумуляторів

Вид	Позначення	Типова ємність, мА·год	діаметр x довжина, мм	Примітка
Сольова	А		17 x 50	
Лужна				
Сольова	АА	1100	14,5 x 50,5	Елементи такого типорозміру виробляють з
Лужна		2700-3000		

ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ, НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ
ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

(Li-FeS ₂)		3000-3500		1907 року і є найбільше поширеними
(Ni-MH)		1700-2900		
(NiCd)		600-1000		
(Ni-Zn)		1800-2000		
Сольова	AAA	540	10,5 x 44,5	Виробляється з 1911 року
Лужна		1000-1100		
(Li-FeS ₂)		1100-1300		
Ni-MH		800-1000		
(Ni-Zn)		650-750		
Лужна	AAAA	625	8,3 x 42,5	Лужні 9-вольтові батареї звичайно складаються з 6 елементів AAAA. Окремі елементи застосовуються в малогабаритних електроприладах
Лужна	B	8350	21,5 x 60	Входять до складу батареї 3336, окремо практично не використовуються
Сольова	C	3800	26,2 x 50	
Лужна		8000		
(NiMH)		4500-6000		
Сольова	D	8000	34,2 x 61,5	Виробляються з 1898 року, розроблені для електричних ліхтариків, використовуються в електроприладах зі значним споживанням енергії
Лужна		19500		
(NiMH)		9000-11500		
Сольова	F		33 x 91	
Лужна				
Лужна	N	1000	12 x 30,2	Використовуються в лазерних указках, безпровідних дверних дзвінках та мікрофонах
Сольова	1/2AA	250	14,5 x 25	
Сольова		500	14,5 x 38	

Сольова	R10	1800	21,5 x 37,3	Використовувалась у вимірювальних приладах та дитячих іграшках
---------	------------	------	-------------	--

2.2 Історичні передумови використання акумуляторних батарей

Накопичення енергії – акумуляція енергії для її подальшого використання. Пристрій, що зберігає енергію, зазвичай називають акумулятором або батареєю. Типовим прикладом пристрою накопичення енергії (енергонакопичувача) є акумуляторна батарея, в якій зберігається хімічна енергія, що легко перетворюється на електрику для роботи мобільного телефону. Менш очевидний приклад – гідроелектростанція: вода в резервуарі виступає в якості джерела потенціальної енергії гравітації. Високоенергетичні види палива, такі як вугілля, нафта і газ, також є накопичувачами енергії, отриманої у свій час від сонячного світла живими організмами, які з часом і перетворилися на ці види палива [20-50].

Використання електрики поза електромережами в ХХ столітті було нішовим ринком, але в ХХІ столітті воно значно розширилося. Портативні пристрої використовуються у всьому світі. Сонячні батареї отримують все ширше розповсюдження в сільській місцевості. Доступ до електрики тепер є питанням економіки, а не розташування. Однак в енергопостачанні транспорту спалювання палива як і раніше переважає.

Енергія може зберігатися у воді, що перекачується на велику висоту з використанням накачування або шляхом переміщення твердої речовини в більш високі місця (гравітаційні батареї). Інші механічні методи передбачають стиснення повітря і розкручування маховиків, тобто перетворення електричної енергії на потенціальну або кінетичну, зі зворотним перетворенням тоді, коли потреба в електриці досягає піку.

Батарея була основним джерелом електричної енергії до появи і розвитку електричних генераторів і електромереж наприкінці 19-го століття. Послідовний розвиток технологій із створення батарей сприяв значним досягненням у галузі електрики, від перших наукових досліджень до виникнення телеграфу і телефонів, і зрештою призвів до появи портативних комп'ютерів, мобільних телефонів, електромобілів, і багатьох інших електричних пристроїв [20-50].

У 1749 році, Бенджамін Франклін, американський полімат і батько-співзасновник США, вперше використав термін «батарея», що описувало сполучені між собою конденсатори, які він використовував в

експериментах з електрикою. Ці конденсатори представляли собою колби із скла, покриті металом з кожної сторони. Ці конденсатори заряджалися за допомогою електростатичного генератора і розряджалися за допомогою контакту їх електрода до металу. Сполучення їх разом у «батарею» дозволило отримати більш сильний розряд. Початково цей термін мав загальне значення «групи із двох або більше подібних об'єктів, що функціують разом», як, наприклад, артилерійська батарея, цей термін почали використовувати для Вольтових стовпів і подібних пристроїв, в яких багато електрохімічних комірок з'єднувалися між собою аналогічно до Бенджамін Франклін. Сьогодні навіть одинична електрохімічна комірка як правило називається батареєю.

Поздовжня батарея, яка за принципом також є Вольтовим стовпом, який розміщено горизонтально, аби уникнути витік електроліту.

У 1780 році, Луїджі Гальвані препарував жабу, яка була підвішена до латунного гачка. Коли він доторкнувся до її лапи своїм залізним скальпелем, нога жаби здригнулася. Гальвані вважав, що енергія, яка призвела до цього скорочення, походила із самої лапи і назвав це «електрикою тварин».

Однак, його друг і науковий співробітник, Алессандро Вольта, не погодився з цією думкою, і вважав що феномен було спричинено наявністю двох різних металів, які контактували за допомогою вологого посередника. Він перевіряв свою гіпотезу за допомогою експерименту, і опублікував результати в 1791 році. У 1800 році, Вольта винайшов першу справжню батарею, що стала відома як Вольтів стовп. Вольтів стовп складався із декількох пар дисків виготовлених із міді та цинку, що розміщувалися зверху один за одним, розділених між собою шарами тканини або картону, вимоченими в ропі (тобто, в електроліті). На відміну від лейденської банки, вольтів стовп утворює постійну електроенергію зі сталим струмом, і втрачає малу кількість заряду коли він не використовується, хоча ранні моделі не дозволяли отримати достатньо сильну напругу, аби утворилися іскри. Він проводив експерименти з різними металами і знайшов, що цинк і срібло давали найкращий результат.

Іншою проблемою батарей Вольта був їх короткий строк служби (декілька годин в найкращому випадку), що було спричинено двома явищами. Першим недоліком було те, що струм який утворювався завдяки електролізу розчину електроліту, призводив до появи плівки із водневих бульбашок, що утворювалися на міді, що

призводило до постійного збільшення внутрішнього опору батареї (цей ефект, що називається поляризацією, в сучасних батареях усувається за допомогою додаткових дій). Іншим недоліком було явище, яке називається локальною дією, при якому відбувалися короткі замикання довкола домішок цинку, що призводило до деградації цинку. Цю проблему у 1835 році вирішив Вільям Стерджен, який встановив, що амальгама цинку, поверхня якою покривалася деякою кількістю ртуті, не мала недоліку із локальною дією.

Комірка Денієлла

Британський хімік на ім'я Джон Фредерік Данієлл винайшов спосіб як розв'язати проблему з водневими бульбашками у Вольтовому стовпі використавши ще один електроліт, який поглинав водень, що утворювався першим електролітом. У 1836 році він винайшов комірку Денієлла, яка складалася з мідної банки, що заповнювалася розчином сульфату міді, в який занурювався неглазурований глиняний контейнер, наповнений сульфатною кислотою із цинковим електродом. Глиняний бар'єр був пористим, що дозволяло іонам проходити крізь нього, але не дозволяло розчинам змішуватися.

Комірка Бьорда

Одну із версій батареї, подібну до комірки Денієлла винайшов у 1837 фізик із лікарні Гая – Голдінг Бьорд, який використав гіпсову штукатурку як бар'єр, що не дозволяв змішуватися розчинам. Експерименти Бьорда із батареєю мали важливе значення для нової дисципліни електрометалургії.

Версія із пористою чашею

Версію з пористим сосудом комірки Денієлла винайшов Джон Денсер, виробник інструментів із Ліверпуля, у 1838. Вона складалася із центрального цинкового аноду зануреного у пористу глиняну чашу, в який містився розчин сульфату цинку. Пориста чаша в свою чергу занурювалася у розчин сульфату міді, що містився в мідній банці, яка виконувала роль катоду даної комірки. Використання пористого бар'єру дозволяло проходити крізь нього іонам, але не дозволяло розчинам змішуватися [30].

Гравітаційна комірка

У 1860-их роках француз на ім'я Калло винайшов різновид батареї, що називалася гравітаційною коміркою. Цей спрощений варіант був виконаний із застосуванням пористого бар'єру. Це дозволило зменшити внутрішній опір системи і, таким чином, батарея видавала більший струм. Вона швидко стала популярною серед

Американських і Британських користувачів телеграфних мереж, і використовувалася до 1950-их років.

Гравітаційна комірка складалася із скляної банки, на дні якої розміщався мідний катод, а під ободом розміщувався цинковий анод. Кристали сульфату міді зосереджувалися б довкола катода і тоді б банка наповнювалася дистильованою водою. При утворенні струму, шар розчину сульфату цинку утворювався б у верхній частині довкола аноду. Цей верхній шар тримали окремо від нижнього шару за допомогою меншої густини верхнього шару і за допомогою полярності самої комірки.

Шар сульфату цинку був більш прозорим у порівнянні із темно синім шаром сульфату міді, що дозволяло персоналу наочно оцінювати строк служби батареї. Але цей варіант батареї передбачалося використовувати лише в стаціонарному застосуванні, інакше розчини б перемішалися або проливалися. Іншим недоліком було те, що струм повинен був генеруватися постійно, аби не дозволити розчинам змішатися шляхом дифузії, то ж цей тип батареї був непридатним для періодичного використання [20-50].

Комірка Поггендорфа

У 1842 німецький вчений Поггендорф Йоганн Християн вирішив проблему із розділенням електроліту і деполяризатора, що виникали при використанні пористого глиняного горщика. У комірки Поггендорфа, іноді її називають коміркою Гренета, через аналогічні роботи у 1859, електроліт був розчинений у сірчаній кислоті, а деполяризатором була хромовая кислота. Дві кислоти були фізично змішані разом, без необхідності мати пористий горщик. Позитивним електродом (катодом) були дві карбонові пластинки, а цинкова пластина (негативний електрод або анод) розміщувалася між ними. Через схильність сильної кислотної суміші взаємодіяти із цинком, було передбачено механізм для підняття цинкового електрода очищеного від кислот.

Комірка Грова

Валлійський винахідник Вільям Гров винайшов свою батарею у 1839 році. Вона складалася із цинкового анода, який занурювався у сульфатну кислоту і з платинового катода опущеного у нітратну кислоту, що розділялися пористою глиною. Комірка Грова забезпечувала високий струм і майже вдвічі більшу напругу ніж комірка Денієлла, що зробило її більш популярною для використання в телеграфних мережах в свій час. Однак, під час роботи вона утворювала отруйні пари оксиду азоту. Напруга різко просаджувалася, як падав

заряд, що стало важливим оскільки телеграфні мережі зростали і ставали складнішими. Платина була дуже дорога [20-50].

Перезаряджувані та сухі батареї

Свинцево-кислотні

До цього часу історії, всі батареї що існували повністю спустошувалися, після того як вичерпувалися хімічні реакції. У 1859 році, Гастон Планте винайшов свинцево-кислотний акумулятор, першу в світі батарею, яку можна було перезарядити пропустивши через неї зворотній струм. Комірка свинцево-кислотного акумулятора складалася із свинцевого анода і катоду із діоксиду свинцю, занурених в сульфатну кислоту. Обидва електроди реагують із кислотою утворюючи сульфат свинцю, але хімічна реакція із свинцевим анодом вивільняє електрони, в той час як катод із діоксиду свинцю споживає їх, таким чином утворюється струм. Ці хімічні реакції можуть протікати в зворотньому напрямку при пропусканні зворотного струму через батарею, таким чином заряджаючи її.

Перша модель батареї, яку розробив Планте складалася із двох свинцевих листів, розділених між собою гумовими смужками згорнутих у спіраль. Вперше ці батареї були використані для живлення вогнів у вагонах поїздів, при зупинці на станції. У 1881 році, Каміль Альфонс Форє винайшов вдосконалену версію батареї, що складалася із свинцевої решітчастої пластини, в яку втискалася паста із оксиду свинцю, утворюючи суцільну пластину. Для більшої продуктивності декілька пластин укладалися в стек. Цей варіант був більш оптимальним для масового виробництва.

Контрольні питання до розділу 2

1. Назвіть основні визначення систем накопичення електричної енергії.
2. Яка класифікація систем накопичення електричної енергії?
3. Які існують габарити акумуляторів?
4. Які історичні передумови використання акумуляторних батарей?
5. Які етапи розвитку систем накопичення енергії
6. Які систем накопичення електричної енергії ви знаєте?
7. Які світові тенденції розвитку та застосування систем накопичення електричної енергії?

РОЗДІЛ 3 СВИНЦЕВО-КИСЛОТНІ АКУМУЛЯТОРНІ БАТАРЕЇ

3.1 Особливості конструкції свинцево-кислотних акумуляторних батарей

Свинцевий акумулятор винайшов у 1859-1860 роках Гастон Планте, співробітник лабораторії Олександра Беккереля. У 1878 році Камілл Фор удосконалив його конструкцію, покривши пластини акумулятора свинцевим суриком.

Акумулятори характеризуються такими параметрами [32-65]:

- електрорушійна сила зарядженого акумулятора 2,1–2,3 В;
- електрорушійна сила розрядженого акумулятора 1,7–1,8 В;
- ККД до 80%;
- термін служби (кількість циклів заряд-розряд) 300–800;
- саморозряд на добу 1–2%.

Хоча свинцево-кислотний акумулятор може мати найвищу ємність при температурах понад 30°C, але тривала експлуатація при таких умовах скорочує функціональність акумулятора.

В залежності від потрібної напруги і загальної ємності акумулятори збирають з кількох елементів. Тому у більшості випадків акумулятор виконується у вигляді послідовного (або паралельного) з'єднання кількох «елементів» – кожен з яких має напругу у 2 В і складається з кількох груп свинцевих пластин вкритих окисом свинцю і кислотою. Свинцева решітка покрита окисом свинцю називають пластиною. Кожен свинцевий елемент, який є групою пластин, має по дві клеми на позитивній стороні елемента, і на негативній. Пластини елемента акумулятора виконують зі свинцю і його двоокису, а роль електроліту належить сірчаній кислоті. Пластини з металевого свинцю мають негативний заряд, а пластини, покриті двоокисом (перекисом) свинцю – позитивний заряд. Пластини чергують таким чином, щоб між пластинами зі свинцю розташовувалися пластини з покриттям з двоокису свинцю. Щоб запобігти короткому замиканню між позитивними і негативними пластинами через фізичний контакт їх розмежують сеператорами у вигляді листів або загортають у матеріал з волокнами скловолкна, а потім у пластикову оболонку. Пластини поміщають в контейнер (зазвичай з пластика) і заливають водним розчином кислоти.

Акумулятори мають аварійний клапан через який у небезпечних ситуаціях скидається надлишок газу (так званий «герметизований акумулятор»).

Моноблоки

Після установки блок акумуляторної батареї являє собою бак, розділений перегородками на секції по числу послідовно з'єднаних акумуляторів батареї.

Товщина ебонітових моноблоків збільшена в порівнянні з пластмасовими і складає відповідно 9...12 мм і 1,5...3.3 мм. Маса пластмасових моноблоків приблизно в 5 разів менше, ніж аналогічних ебонітових моноблоків.

На дні кожної секції моноблока є по 4 опорні призми, на які встановлюються пластини і сепаратори. Простір між дном моноблока і верхньої частини опорних призм висотою 15...20 мм служить для нагромадження шламу і запобігання замикання шламом пластин різнойменної полярності.

Кришки і пробки

Після установки блоків пластин кожен акумулятор чи моноблок у цілому закривається кришкою з ебоніту чи пластмаси.

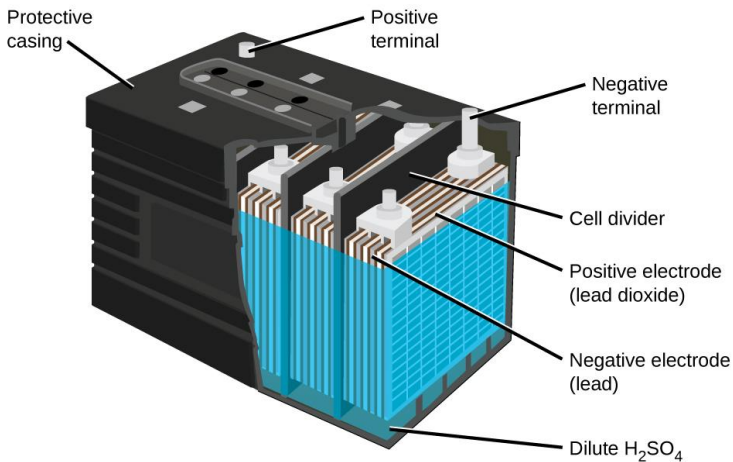


Рисунок 3.1 – Свинцева стартерная малообслужуванна акумуляторна батарея

У конструкції батареї з окремими кришками на акумулятори в кришці виконані два отвори з завитими в них свинцевими втулками для заливання електроліту і періодичного обслуговування акумулятора при експлуатації.

Пластини і напівблоки пластин

Пластина акумулятора складається струмовідводу і нанесеної на нього пористої активної маси.

Для акумуляторних батарей, що необслуговуються, струмовідводи пластин виготовляють з безсурмянистих свинцево-кальцієво-оловянистих сплавів, що містять 0,07...0,10% кальцію і 0,10...0,12% олова. У сучасних батареях, що необслуговуються, іменованих "кальцій плюс", струмовідводи негативних пластин виготовляють зі свинцево-кальцієво-оловянистого сплаву, а струмовідводи позитивних пластин – зі сплаву свинцю, легованого сурмою (1,25%) і кадмію (1,5%).

Одноіменні пластини шляхом розплавлення вушок пластин і додавання свинцево-сурмянистого сплаву у форму з'єднуються за допомогою моста і борна у напівблок пластин. Напівблоки позитивних і негативних пластин, зібрані із сепараторами, утворюють блок пластин. Зверху блоку пластин у кожен акумулятор установлюється перфорований запобіжний щиток для захисту крайок сепараторів від ушкоджень при вимірах температури, щільності і рівня електроліту [32-65].

Сепаратори

Мікропористі сепаратори, розташовані між різноїменними пластинами, призначені для запобігання пластин від коротких замикань, фіксації відстані між пластинами створення необхідного запасу електроліту.

До мікропористих сепараторів пред'являються наступні вимоги: висока хімічна стійкість, достатня механічна міцність, еластичність, мінімальні електроопір, гігроскопічність.

Сепаратори звичайних батарей являють собою аркуші, що мають ребристу поверхню з боку, зверненої до позитивних пластин, для кращого доступу електроліту до них. Сепаратори виготовляють з мікропористої гуми мікропористої пластмаси.

Міжелементні з'єднання і полюсні виводи

Для з'єднання акумуляторів у батарею застосовуються зовнішні чи внутрішні перемички – міжелементні з'єднання.

У батареях із загальними кришками з'єднання акумуляторів здійснюється шляхом деформації середніх борнов і наступного контактного зварювання борнов через отвори в перегородках моноблока, тобто утворення внутрішніх міжелементних з'єднань. Цей спосіб дозволяє зменшити витрата свинцю і знизити внутрішній опір батареї.

До вивідних борнам крайніх акумуляторів приварюються полосні виводи.

Умовна позначка батареї складається з цифр і букв і має наступну структуру:

1) цифра, що вказує число послідовно з'єднаних акумуляторів у батареї (3 чи 6), що характеризує її номінальну напругу (відповідно 6 чи 12 В);

2) буква, що характеризує призначення батареї (СТ – стартерна);

3) число, що вказує номінальну ємність батареї в ампер-годинах при 20-годинному режимі розряду (320);

4) букви, що позначають матеріал моноблока і сепаратора (Т – моноблок з термопластичної пластмаси, Э – з ебоніту; У – сепаратор з міпласта, Р – з міпора, П – з поровинила), а також позначають виконання батареї (А – у пластмасовому моноблоці з загальною кришкою, З – залита електролітом і цілком заряджена). Наприклад, умовна позначка акумуляторної батареї 6 СТ-190 ТР вказує, що батарея складається із шести послідовно з'єднаних акумуляторів (номінальна напруга 12 В), призначена для електростартерного пуску двигуна; номінальна ємність складає 190 А·год при 20-годинному режимі розряду, моноблок виготовлений з термопласта, а сепаратор – з міпора.

Визначення номінальної ємності при розряді батареї є однієї з контрольних перевірок її стану в процесі експлуатації і можливості порівняння батарей.

Номінальна ємність – кількість електрики, виражена в ампер-годинах, що отримано при безупинному розряді цілком зарядженої батареї постійним струмом, рівним $0,05C_{20}$ (C_{20} – номінальна ємність при 20-годинному режимі розряду, зазначена й умовній позначці батареї) при температурі $+25^{\circ}\text{C}$ до досягнення кінцевої напруги на полюсних висновках батареї 5,25 чи 10,5 В відповідно для батареї з номінальною напругою 6 чи 12 В.

Якщо температура електроліту при розряді батареї відрізняється від $+25^{\circ}\text{C}$ і знаходиться в інтервалі від $+18$ до $+27^{\circ}\text{C}$, то отримана ємність повинна бути приведена до ємності при температурі $+25^{\circ}\text{C}$ по формулі [32-65]:

$$C_{20} = \frac{C_t}{1 + 0.01(t_e - 25)} \quad (3.1)$$

де C_t – ємність, отримана при розряді, А-год; t_e – температура електроліту середня при розряді.

Як додатковий показник визначається резервна ємність батареї. Це тривалість розряду (у хвиликах) батареї силою струму $I_p=25$ А при температурі $+27^\circ\text{C}$ до досягнення кінцевої напруги акумулятора 1,75 В чи для батареї з номінальною напругою 6 В до 5.25 В и 12 В – до 10,5 В.

Саморозряд акумуляторної батареї S (у відсотках) визначається по формулі;

$$S = \frac{C_{20\text{поч}} - C_{20\text{кін}}}{C_{20\text{поч}}} * 100, \quad (3.2)$$

де $C_{20\text{поч}}$ і $C_{20\text{кін}}$ – відповідно початкова і кінцева (після бездіяльності) ємність батареї при 20-годинному режимі розряду, А-г.

Саморозряд цілком зарядженої акумуляторної батареї, крім що необслуговується, після бездіяльності протягом 14 доби при температурі навколишнього середовища $+20\pm 5^\circ\text{C}$ не повинний перевищувати 7%. Саморозряд батареї, що необслуговується, після бездіяльності протягом 90 доби повинний складати не більш 10%, а після року бездіяльності – не більш 40%. від номінальної ємності.

3.2 Заряд свинцево-кислотних акумуляторних батарей

Для заряду свинцево-кислотного акумулятора його пластини відповідно до полярності підключають до зарядного пристрою – виникає зворотна хімічна реакція. В результаті цього з електроліту поглинається вода, збільшуючи концентрацію кислоти, на негативній пластині виділяється металевий свинець, а на позитивній – його двоокис.

Глибокий розряд або постійні часткові розряди свинцево-кислотних акумуляторів неприпустимі, тому що при цьому виникає сульфатація пластин, вона розлога, на їх поверхні виникають білі кристали сірчано-кислого свинцю, які не розчинні в електроліті сірчаної кислоти.

Сульфатація також виникає при недостатньому рівні розчину кислоти, коли пластини лише частково заповнені електролітом.

Глибока сульфатація призводить до підвищеного виділення газу в акумуляторі, через що він може, за відсутності захисного пристрою, вибухнути.

Слід зазначити, що неглибока сульфатація завжди супроводжує функціонування працездатного акумулятора, в той час як глибока сульфатація може призвести до повного виходу пристрою з ладу [32-65].

Свинцеві акумулятори мають високі розрядні напруги (рис. 3.3) і питому потужність (до 100...150 $Вм/кг$) і відносно недорого. До основних їхніх недоліків варто віднести низьку питому енергію і відносно малий ресурс.

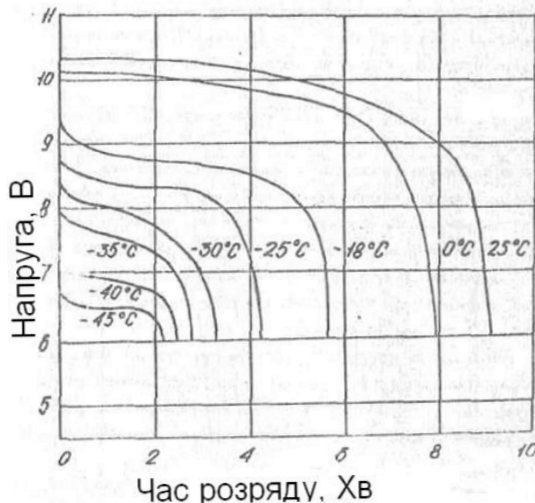


Рисунок 3.3 – Криві розряду (1) і заряду (2) свинцевого акумулятора

Удосконалювання свинцевих акумуляторів йде по шляху вишукування нових сплавів для ґраток (наприклад, свинцево-кальцієвих), полегшених і міцних матеріалів корпусів (наприклад, на основі сополімера пропилену і етилену), поліпшення якості сепараторів.

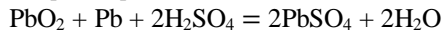
Для контролю ступеня зарядженості свинцево-кислотних акумуляторів можна використовувати напругу розімкненого кола, що змінюється від 2,05– 2,15 В/ак при зарядженому стані (залежно від концентрації кислоти) до 1,95– 2,03 В/ак після повного розрядження (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Залежність напруги розімкнутого кола свинцево-кислотного акумулятора від рівня зарядженості [19]

При контролі зарядженості свинцево-кислотного акумулятора в ході заряджання, заряд вважається завершеним якщо струм заряду (при незмінній стандартній напрузі заряду) залишається незмінним упродовж 3 годин.

У свинцевому акумуляторі процеси протікають зворотно. Активні речовини, витрачені в процесі реакції, можуть відновлятися під час пропущення через акумулятор постійного струму від іншого джерела постійного струму. Цей процес, перетворення електричної енергії в хімічну наз. – заряджанням. Хімічні зміни, які відбуваються під час розряджання – заряджання свинцевого акумулятора, записуються рівнянням [32-65]:



Де зліва праворуч маємо процес розряджання, а справа ліворуч – заряджання.

Методи заряду акумуляторних батарей

Модифікований заряд – застосовується для зниження сили струму в початковий період заряду і зменшення коливань напруги в зарядній мережі на зарядний струм. В мережу заряду вмикається невеликий резистор. Напруга в зарядній мережі підтримується постійною в межах 2,5 – 3 В на кожний акумулятор.

Форсирований заряд – для швидкого відновлення працездатності сильно розрядженої АКБ. Заряд силою зарядного струму $0,7C_{20}$. А. Час заряду – до 30хв, $0,5C_{20}$ А, при 45 хв.. При підвищенні температури більш 40°C заряд не проводиться Такий заряд скорочує термін служби АБ.

Зрівнювальний заряд – для забезпечення вирівнювання густини електроліту та ступені зарядженості окремих акумуляторів батареї, відновлення активної маси на електродах. В основному використовується для видалення можливої сульфатації і закінчується через 3 години після установаження постійної густини електроліту.

Постійний підзаряд малим струмом – 0,025 – 0,1 А – вибирається із умов компенсації саморозряду. Підзаряд може проводитися при $I = \text{const}$, або $U = \text{const}$.

Контрольно-тренувальний цикл – один раз на рік, для батарей залитих електролітом, та в тих випадках коли необхідно оцінити можливості батареї для подальшої експлуатації.

3.3 Особливості експлуатації свинцево-кислотних акумуляторних батарей

До переваг свинцево-кислотних акумуляторів належать: довговічність, невелика вартість, надійність, низький внутрішній опір і відсутність ефекту «пам'яті».

До недоліків: велика маса; використання отруйних речовин; неможливість розряду акумулятора при температурі нижче -40°C і заряду при 0°C ; неможливість зберігання пристрою в розрядженому стані; в окремих випадках – виділення газів при неправильній експлуатації; значний саморозряд, що досягає 1% протягом 24 годин [32-65].

Заряд акумуляторної батареї проводиться в режимі постійного струму. При досягненні напруги не менш 2,4В на кожному акумуляторі для батарей із загальною кришкою 7,2 В для 6-вольтних і 14,4 В для 12-вольтних) величина зарядного струму повинна бути зменшена на 50% те первісної, і заряд продовжується до досягнення повної зарядженості батареї. Кінець заряду визначається сталістю напруги і щільності електроліту в плинні 2 годин і характеризується рясним газовиділенням у всіх акумуляторах батареї.

Коректування щільності виробляється долівкою дистильованої води, якщо щільність електроліту перевищує що рекомендується, чи долівкою електроліту щільністю 1,40 г/см³ при зниженій щільності. Після коректування щільності електроліту для повного перемішування його необхідно продовжити заряд протягом 0,5 години. Після відключення батареї через 0,5 години виробляється вимір і коректування рівня електроліту. Після першого заряду батареї можуть бути здані в експлуатацію.

Після приведення акумуляторних батарей у робочий стан і установки їх на автомобілі і трактори необхідно строго дотримувати правила експлуатації батарей і періодично проводити технічне обслуговування їх.

Свинцеві акумуляторні батареї звичайного типу при технічному обслуговуванні вимагають перевірки рівня електроліту не рідше 1 рази в двох тижнів і при необхідності долівки дистилірованої води до рівня, поки дзеркало електроліту не торкнеться нижнього торця тубуса горловини чи кришки при відсутності тубуса 10...15мм вище запобіжного щитка.

Однієї з причин, що приводять до передчасного виходу батарей з ладу, є підвищений саморозряд акумуляторних батарей. Під саморозрядом розуміється втрата акумулятором ємності через мимовільно протікають усередині нього хімічних процесів. Саморозряд відбувається при утворенні гальванічних елементів між свинцем ґрат і активною масою пластин у присутності електроліту, наявності домішок у матеріалі пластин і електроліті, а також при виникненні різниці потенціалів по висоті пластин через різну щільність електроліту біля нижньої і верхньої частини пластин.

Основні несправності акумуляторних батарей з окремими кришками можуть бути усунуті при ремонті. АБ із загальними кришками і батареї, що необслуговуються, не підлягають ремонту.

Контрольні питання до розділу 3

1. Опишіть конструкцію свинцево-кислотної акумуляторної батареї.
2. Який принцип роботи свинцево-кислотної акумуляторної батареї?
3. Які особливості зарядних характеристик свинцево-кислотної акумуляторної батареї
4. У чому переваги свинцево-кислотної акумуляторної батареї?
5. Які недоліки свинцево-кислотної акумуляторної батареї?

РОЗДІЛ 4 НІКЕЛЬ-КАДМІНІЄВІ АКУМУЛЯТОРНІ БАТАРЕЇ

4.1 Конструкція нікель-кадмієвих акумуляторних батарей

За будовою NiCd акумулятор є схожим на нікель-метал-гідридний акумулятор. Конструкція корпусів Ni-MH акумуляторів і NiCd акумуляторів однакова, конструкція позитивних електродів та склад електроліту – ідентичні.

Нікель-метал-гідридний акумулятор (NiMH) – електричний акумулятор з категорії вторинних батарей у якому позитивним електродом є окисно-нікелевий електрод, а негативним – електрод зі сплавів нікелю з металами рідкоземельної групи, здатних до адсорбції водню і десорбції його при зміні полярності [38-75].

Нікель-метал-гідридні АКБ отримали широке поширення як накопичувач електроенергії приблизно в початку 80-х рр. XX ст. У порівнянні з нікель-кадмієвими АКБ мають більшу щільність енергії. Катод даних АКБ виконаний з гідриду металу.

Перевагами нікель-метал-гідридних АКБ є:

1. Більша питома ємність (до 30 %).
2. Менша вага.
3. Менша схильність до «ефекту пам'яті».
4. Більша екологічна безпечність.

Недоліками нікель-метал-гідридних АКБ є:

1. Менша кількість циклів заряду/розряду.
2. Вища вартість.
3. Менший, у порівнянні з NiCd, температурний діапазон.
4. Менша сила струму.
5. Недопустимість глибоких розрядів.
6. Високий саморозряд.

На відміну від нікель-кадмієвого акумулятора, в якому негативним електродом є кадмієвий електрод, нікель-метал-гідридні акумулятори мають вищі енергетичні характеристики, однак мають вужчий температурний діапазон експлуатації і до того ж мають трохи більший саморозряд і більш чутливі до перегріву, що призводить до необхідності вбудовування в батареї елементів захисту.

Вартість однієї А-год нікель-метал-гідридних акумуляторів на 30-50% вища, ніж у нікель-кадмієвих. NiMH акумулятори можуть мати ємність в 2-3 рази більшу від NiCd, а їх густина енергії наближується до густини енергії літій-іонних акумуляторів.

Напруга елемента: максимальна – 1,4В (повний заряд); мінімальна – 0,9В (повний розряд).

Цей тип батареї особливо популярний для використання в цифрових камерах, тому що вони можуть витримувати високі навантаження і при цьому забезпечити гарну, на відміну від звичайних лужних батарей продуктивність.

Анодом є металічний кадмій Cd (у вигляді порошку), електролітом – гідроксид калію KOH з додаванням гідроксиду літію LiOH (для утворення нікелатів літію і збільшення ємності на 21-25 %), катод – гідрат окису нікелю NiOOH з графітовим порошком (близько 5-8 %). ЕРС нікель-кадмієвого акумулятора близько 1,45 В, питома енергія близько 45–65 Вт·год/кг. В залежності від конструкції, режиму роботи (тривалі чи короткі розряди), і чистоти матеріалів, що застосовуються, термін служби становить від 100 до 3500 циклів заряд-розряд.

При зберіганні у розрядженому стані нікель-кадмієві акумулятори не втрачають працездатності протягом тривалого періоду – до 10 років.

4.2 Особливості заряду нікель-кадмієвих акумуляторних батарей

Основна проблема, що виникає при зарядженні акумуляторів, полягає в пошуку параметра, вимірювання якого дозволило б із достатньою точністю визначити стан повного заряду.

У ході заряду герметичних лужних акумуляторів змінюється кілька параметрів: напруга, температура, внутрішній тиск. Характер їх змін у процесі заряду герметичного нікель-кадмієвого акумулятора зображений на рис.4.1. Ці параметри забезпечують різну чутливість і мають різні обмеження при використанні.

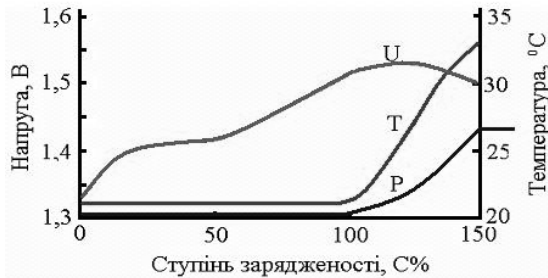


Рисунок 4.1 – Зміна характеристик герметичного нікель-кадмієвого акумулятора при зарядженні [19]

Зарядження стандартним режимом, як правило, проводиться впродовж регламентованого часу. Контроль напруги при такій стратегії заряду малоефективний, тому що при низьких густинах струму заряду напруга наприкінці процесу (Укін) змінюється незначно, і контроль процесу за його величиною, обраною відповідно до рекомендованого виробника як типовою для даного типу джерела струму, може привести до недозаряду одних і перезаряду інших акумуляторів (залежно від їх індивідуальних зарядних характеристик). Паспортна величина кінцевої напруги показує тільки статистичний параметр, а розкид його в акумуляторах у партії може бути помітним. До того ж ця величина залежить від температури й напруження акумулятора. При швидкому зарядженні використання напруги як контрольного параметра, виявилось більш результативним. Це визначається зміною виду зарядної кривої. У цьому випадку немає потреби орієнтуватися на конкретну величину граничної зарядної напруги, потрібно лише встановити момент досягнення його максимальної величини. Максимум зарядної напруги спостерігається, як правило, при заряді до 110–120 %. У разі припинення зарядження при наступному розряді в стандартному режимі вдається відновити близько 95 % номінальної ємності акумулятора.

Для забезпечення більшого перезаряду (до 140–160 %) потрібно або необхідний час зберігати заряд тим самим струмом, або забезпечити перехід до більш безпечного режиму підзарядження меншим струмом [19].

Усі виробники, як правило, рекомендують максимальну величину температури при швидкому зарядженні – не більше 55 °С. Варто розуміти, що при підвищених температурах навколишнього середовища уникнути недозаряду при такому способі контролю зарядного процесу не вийде. Більш раціональним є контроль іншого параметра: швидкості зміни температури ($\Delta T/\Delta t$), що дозволяє при будь-якій температурі навколишнього середовища діагностувати інтенсифікацію побічних процесів, що має місце при перезаряді. Величина $\Delta T/\Delta t$, при якій різні виробники рекомендують вимкнути герметичні лужні акумулятори, перебуває в інтервалі від 1 до 2 °С/хв, а при меншому струмі заряду – 1С і 0,8 °С/хв.

Знайдений ще один електричний параметр, що за величиною значно більший від змін напруги. Цей параметр – реакція джерела струму на тестовий сигнал змінного струму [19].

4.3 Експлуатаційні характеристики нікель-кадмінієвих акумуляторних батарей

Переваги і недоліки нікель-метал-гідридних акумуляторів

Характеристики Ni-MH акумуляторів суттєво залежать від сплаву негативного електрода і технології обробки цього сплаву для збільшення стабільності його складу і структури. Як наслідок, це змушує і виробників акумуляторів уважно ставитися до вибору постачальників сплаву, і покупців акумуляторів – до вибору компанії-виробника.

Недоліки Ni-MH акумуляторів перед NiCd акумуляторами

Ni-MH акумулятори поступаються NiCd акумуляторам за такими експлуатаційними характеристиками [38-75]:

– ефективно працюють у вужчому діапазоні робочих струмів, що пов'язане з обмеженою десорбцією водню металгідридного електрода при надзвичайно високих швидкостях розряду;

– у процесі заряду Ni-MH акумуляторів виділяється більше тепла, ніж при заряді Ni-Cd акумуляторів, тому з метою запобігання перегріву батареї з Ni-MH акумуляторів у процесі швидкого заряду і/або значного перезаряду в них встановлюють термозапобіжник або термореле, які розміщують на стінці одного з акумуляторів у центральній частині батареї;

– мають підвищений саморозряд, що визначається неминучістю реакції водню, розчиненого в електроліті, з позитивним оксидно-нікелевим електродом (однак, завдяки використанню спеціальних сплавів негативного електрода, вдалося досягти зниження швидкості саморозряду до величин, близьких до показників для Ni-Cd акумуляторів);

– небезпека перегріву при заряді одного з Ni-MH акумуляторів батареї, а також переполюсування акумулятора з найменшою ємністю при розряді батареї зростає з неузгодженістю характеристик акумуляторів у результаті тривалого циклування; тому розробка батарей більш, ніж з 10 акумуляторів не рекомендується всіма виробниками;

– втрати ємності негативного електрода, які мають місце в Ni-MH акумуляторі при розряді нижче 0 В, безповоротні, що висуває більш жорсткі вимоги до вибору акумуляторів у батареї і контролю процесу розряду, порівняно з використанням Ni-Cd акумуляторів; звичайно рекомендується розряд до 1 В/ак у батареях невеликої напруги й до 1,1 В/ак батареї з 7-10 акумуляторів.

Основні переваги акумуляторів з низьким саморозрядом:

- низька втрата ємності заряду під час зберігання (10-20% в рік);
- можливість працювати з великим струмом розряду;
- можливість працювати при низьких температурах (втрата ємності при -20°C становить не більше 12%);
- можливість швидкого заряду;
- довгий термін роботи (до 1500 циклів) і краще зберігання ємності під час експлуатації.

Контрольні питання до розділу 4

1. Опишіть конструкцію нікель-кадмієвих акумуляторної батареї.
2. Який принцип роботи нікель-кадмієвих акумуляторної батареї?
3. Які особливості зарядних характеристик нікель-кадмієвих акумуляторної батареї
4. У чому переваги нікель-кадмієвих акумуляторної батареї?
5. Які недоліки нікель-кадмієвих акумуляторної батареї?

РОЗДІЛ 5 ЛІТІЙ-ІОННІ АКУМУЛЯТОРНІ БАТАРЕЇ

5.1 Особливості побудови літій-іонних акумуляторних батарей

Перший літій-іонний акумулятор вивела на ринок корпорація Sony в 1991 році.

Сучасні літій-іонні акумулятори мають високі показники: 100-180 Вт·год/кг і 250-400 Вт·год/дм³, робоча напруга – 3,5-3,7 В.

Якщо ще кілька років тому розробники вважали досяжною ємність літій-іонних акумуляторів не більше кількох ампер-годин, то нині більшість причин, що обмежують збільшення ємності, подолано і багато виробників почали випускати акумулятори ємністю в сотні ампер-годин:

- енергетична місткість: 110 ... 200 Вт·год/кг;
 - внутрішній опір: 150 ... 250 мОм (для батареї 7,2 В);
 - число циклів заряд/розряд до втрати 20 % місткості: 500-1000;
 - час швидкого заряду: 2-4 години;
 - допустимий перезаряд: дуже низький;
 - саморозряд при кімнатній температурі: 7 % в рік;
 - напруга максимальна в елементі: 4,18..4,20 В (повністю заряджений);
 - напруга мінімальна: 2,5..2,75 В (повністю розряджений)
- Струм навантаження відносно місткості (С):
- піковий: понад 2С;
 - найбільше допустимий: до 1С;
 - діапазон робочих температур: –20 – +60 °С;
 - обслуговування: не регламентується.

Сучасні малогабаритні акумулятори працездатні при струмах розряду до 2С, потужні – до 10-20С. Діапазон робочих температур: від –20 до +60°С. Але багато виробників вже розробили акумулятори, працездатні при –40 °С. Можливе розширення температурного діапазону і в бік вищих температур.

В основному Li-іон акумулятори краще всього функціонують при кімнатній температурі. Робота при підвищеній температурі скорочує термін дії їх використання. Підвищена температура тимчасово протидіє внутрішньому опору акумулятора, збільшення якого призводить до його зносу.

Саморозряд становить 4-6 % за перший місяць, потім – значно

менше: за 12 місяців акумулятори втрачають 10-20 % запасеної ємності. Втрати ємності в кілька разів менші, ніж у нікель-кадмієвих акумуляторів, як при 20°C, так і при 40°C [48-95].

Ресурс літєвих акумуляторів – 500–1000 циклів.

Всі літєві акумулятори мають досить прийнятні для зберігання параметри. Втрата ємності за рахунок саморозряду 5-10 % за рік.

Літій-іонні акумулятори доступні в різних форм-факторах, які в цілому можна розділити на чотири групи [48-95]:

– невеликі циліндричні (тверді тіла без терміналів, таких як батареї для портативних комп'ютерів);

– великі циліндричні (тверде тіло з великими гвинтовими клемми);

– в чохлах (м'які, плоскі тіла, такі, як ті, які використовуються в мобільних телефонах);

– призматичні (напівжорсткий пластиковий корпус з великими гвинтовими клемми), наприклад, у габариті 6Т для бронетехніки.

Конструктивно Li-іон акумулятори, як і лужні (Ni-Cd, Ni-MH), виготовляються в циліндричному и призматичному варіантах.

У циліндричних акумуляторах згорнутий у вигляді рулону пакет електродів і сепаратора вбудований у сталевий або алюмінієвий корпус, з яким з'єднаний негативний електрод. Позитивний полюс акумулятора виведений через ізолятор на кришку.

Літій – найлегший метал, тому його використання зменшує вагу акумулятора. Катод у літєвих акумуляторах роблять із сильних окислювачів. В результаті реакції утворюються позитивні іони. Вони проходять через електроліт і осідають на позитивному електроді. Коли весь літій у вигляді іонів осів на катоді, акумулятор розряджений. При заряджанні процес відбувається у зворотному напрямку – іони літію осідають на аноді, де насичуються електронами і стають нейтральними атомами [23] (рис.4.1).

У сучасних літєвих акумуляторах чистий літій не застосовується. Зараз поширені три типи літєвих акумуляторів:

– Літій-іонні (Li-ion). Номінальна напруга (ином.) -3,6 V;

– Літій-залізо фосфатні (Li-Fe або LFP). ином. -3,3 V;

– Літій-полімерні (Li-Po, Li-polymer або «ліпо»). ином. -3,7 V.

Всі ці типи літєвих акумуляторів розрізняють за матеріалом катода або типом електроліту. В Li-іон використовується катод з кобальтата літію LiCoO_2 , в Li-Po застосований електроліт з гелеподібного полімеру, а в Li-Fe використовується катод з літій-феро-

фосфату LiFePO_4 .

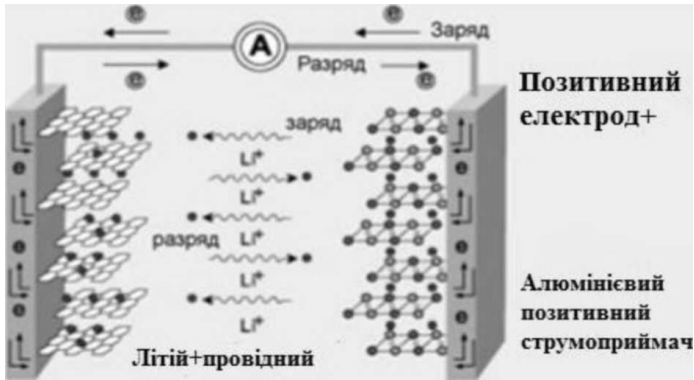


Рисунок 5.1 – Схема роботи літійового акумулятора

Li-Іон акумулятори

Такі акумулятори широко використовуються в промисловому обладнанні та повсякденному використанні (рис. 5.2). Вони мають високу енергетичну щільність, порядку $100\text{Вт}\cdot\text{г}/\text{кг}$, і забезпечують приблизно 300-500 циклів заряд/розряд.

Акумулятори мають дуже низьку швидкість саморозряду (приблизно 3-5 % в перший місяць, потім зменшення до 1-3 % в місяць, додатково близько 3 % споживає схема управління). Крім того, при однакових габаритах, літійові джерела живлення працюють втричі довше, у порівнянні з Ni-Cd-акумуляторами, і у них абсолютно відсутній ефект пам'яті. Що стосується недоліків – насамперед, це висока ціна. Такі батареї необхідно зберігати в зарядженому стані, і у них є ефект старіння, навіть якщо акумулятор не використовується. Цей ефект проявляється в тому, що через рік після виготовлення знижується його ємність, а через два роки він іноді виходить з ладу [24-27].



Рисунок 5.2 – Схема конструкції літійового акумулятора

Li-Fe акумулятори

Дані акумулятори являються аналогічними за структурними особливостями до Li-Ion акумуляторів і відрізняються лише використанням феро-фосфату літію в якості катоду. Але застосування такої речовини додає переваг у технічних характеристиках. Наприклад, напруга повністю зарядженого елемента в LiFePO_4 становить близько 3,65 V. Ці елементи значною мірою менш залежні від перезарядження, хоча виробники вкрай не рекомендують заряд вище 3,9 V і тільки кілька зарядів до 4,2 V за весь час життя елемента. Напруга повністю розрядженого елемента може становити до 2,5-2 V [28].

Взагалі, LiFePO_4 володіють гарними технічними характеристиками і могли б претендувати на місце найкращих ХДС на основі літію, але їх розробка знаходиться на досить ранній стадії. Виробники заключають контракти на постачання своїх акумуляторів лише з дуже потужними промисловими заводами. А масові зразки китайського виробництва в роздрібній торгівлі, які позиціонуються як літій-феро-фосфатні акумулятори на перевірку виявляються підробками і не володіють зазначеними високими характеристиками.

Li-Pol акумулятори

Це одна з найбільш досконалих конструкцій акумуляторних джерел живлення. Принципово іонно-літійові і полімерно-літійові акумулятори не розрізняються, але останні мають одну важливу

перевагу – оскільки їх робочою речовиною є гель, що складається з суміші полімеру і електроліту, то витік рідини стає просто неможливим.

Можливість заміни рідкого органічного електроліту на полімерний (при зниженні ймовірності його витоків) і збільшення безпеки роботи літій-іонного акумулятора вивчалися з самого початку комерціалізації цих джерел струму[29].

В основі ідеї літій-полімерного акумулятора (Li-pol або Li-polymer) лежить відкрите явище переходу деяких полімерів в напівпровідниковий стан в результаті впровадження в них іонів електроліту. Такі акумулятори забезпечують не гірші питомі характеристики, ніж у літій-іонних акумуляторів, але завдяки відсутності рідкого електроліту вони більш безпечні у використанні. Li-pol акумулятори компактні і можуть бути виконані в будь-якій конфігурації. Їх контейнер може бути виконаний з металізованого полімеру [30]. Оскільки вони використовують гелієвий електроліт, то можуть мати нетрадиційну форму. Ці джерела мають ще більш високу енергетичну щільність (до 160 Вт·г/кг) і малий струм розряду, причому нинішні зразки здатні витримати дуже велику кількість циклів заряд/розряд -близько 1000. Ще однією перевагою цих акумуляторів є те що вони досить компактні і легкі.

Полімерно-літєві акумулятори складаються з секцій або стеків. Кожна з секцій містить три електроди і сепаратор з полімером, який діє як електроліт і як зв'язуюча речовина. Негативний електрод розташований між двома позитивними і за допомогою термального впливу всі компоненти об'єднують у стек (рис. 5.3).

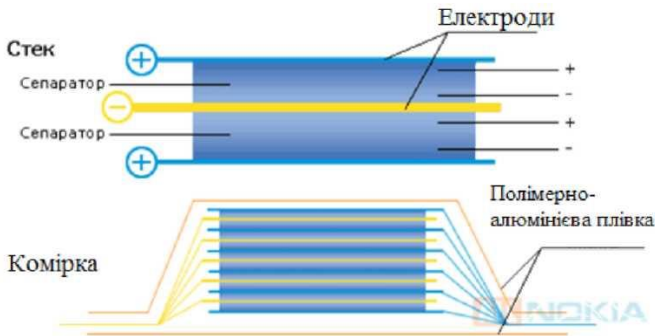


Рисунок 5.3 – Схема внутрішньої структури Li-Pol-акумулятора

До теперішнього часу розроблені і серійно виготовляються літєві джерела струму з електролітами, які можуть бути поділені на три групи:

- сухі полімерні електроліти (найчастіше на базі поліетиленоксиду, в який вводяться різні солі Li);
- гелі-полімерні гомогенні електроліти, які утворюються при впровадженні в полімер (або суміш полімерів) солей Li з пластифікатором-розчинником;
- неводні розчини солей Li, сорбовані в мікропористій полімерній матриці [31].

5.2 Заряд літій-іонних акумуляторних батарей

Для того, щоб напруга акумулятора була достатньо високою, дослідники використали оксид кобальту як активний матеріал позитивного електрода. Літійований оксид кобальту (точніше кобальтат літію) має потенціал близько 4 В відносно літєвого електрода, тому робоча напруга Li-іон акумулятора має характерне значення 3 В і вище [48-95].

При розряді Li-іон акумулятора відбувається деінтеркаляція (вилучення) літію з вуглецевого матеріалу (на негативному електроді) та інтеркаляція (упровадження) літію в оксид (на позитивному електроді). При заряді акумулятора процеси проходять у зворотному напрямку. Отже, у всій системі відсутній металевий (нуль-валентний) літій, а процеси розряду й заряду зводяться до переносу іонів літію з одного електрода на інший. Тому такі акумулятори одержали назву «літій-іонні».

Процеси на негативному електроді Li-іон акумулятора. Для всіх типів Li-іон акумуляторів, які доведені до комерціалізації, негативний електрод виготовляється з вуглецевих матеріалів. Інтеркаляція літію у вуглецевих матеріалах – це складний процес, механізм і кінетика якого істотно залежать від природи вуглецевого матеріалу і природи електроліту.

Вуглецева матриця, яка застосовується в аноді, може мати впорядковану шарувату структуру, як у природного або синтетичного графіту, неупорядковану аморфну або частково впорядковану (кокс, піролізний або мезофазний вуглець, сажа та ін.).

Процеси на позитивному електроді Li-іон акумулятора. Якщо в первинних літєвих батареях застосовуються різноманітні активні матеріали для позитивного електрода, то в літєвих акумуляторах вибір матеріалу позитивного електрода обмежений.

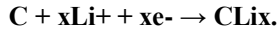
Позитивні електроди літій-іонних акумуляторів створюються винятково з літійованих оксидів кобальту або нікелю і з літій-марганцевих шпінелей.

У даний час як катодні матеріали все частіше застосовуються матеріали на основі змішаних оксидів або фосфатів.

З практики видно, що з використання катодів зі змішаних оксидів досягаються найкращі характеристики акумулятора. Освоюються і технології покриття поверхні катодів тонкодисперсними оксидами. При заряді Li-ion акумулятора відбуваються реакції на позитивних пластинах:



і на негативних пластинах:



При прикладенні постійної напруги іони літію виходять з анода, проходять через електроліт і осідають у графіті, заряджаючи його. При відключенні напруги в електроліті утворюється подвійний шар, який не дозволяє іонам перебігти назад. Розрядка відбувається практично тільки за рахунок електричного струму через зовнішнє коло.

Відповідно до принципів позначень МЕК (Міжнародної електротехнічної комісії) у найменуванні літій-іонних акумуляторів перша буква **I** означає електрохімічну систему, друга – матеріал катода (**C**, **N** або **M** для кобальту, нікелю або марганцю), третя буква **R** або **P** – конструктивне виконання (циліндричне або призматичне). Цифри після букв позначають у циліндричних акумуляторах діаметр (мм, дві цифри) і висоту (десятих мм, три цифри), призматичних – довжину, ширину й висоту (мм) послідовно.

Багато компаній уводять свої літерні позначення типів, але цифри в їх найменуваннях відповідають вимогам МЕК.

Літій-полімерні акумулятори вимагають особливого режиму заряду: на відміну від свинцево-кислотних батарей, при заряді яких допускається досить гнучкий діапазон напруги кінця підзарядки, до величини напруги при заряді зазначених акумуляторів пред'являються значно жорсткіші вимоги [35].

При розряді в процесі експлуатації неприпустимо зниження напруги на кожному з стеків нижче 3 V. Достатньо один раз розрядити Li-Pol батарею до 2,5 V на стек, і вона вийде з ладу[38]. Після такого розряду батарея може «роздутися», вона втрачає більше половини ємності і перестає віддавати номінальний струм розряду. Протягом деякого часу батарея втрачає ємність практично повністю [40].

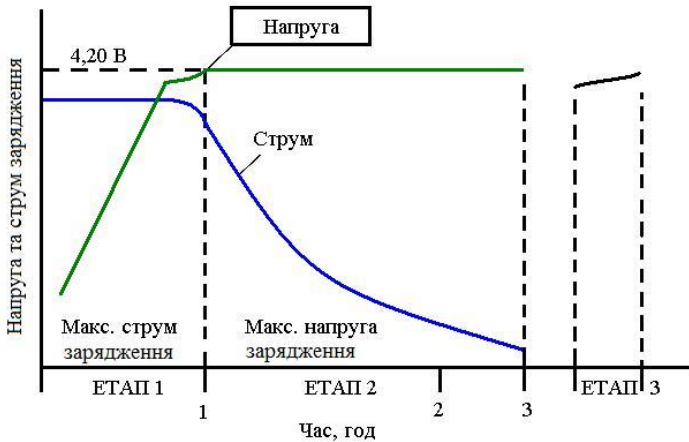


Рисунок 5.4 – Стандартний процес зарядження літій-іонного акумулятора [19]

5.3 Пристрої захисту літій-іонних акумуляторних батарей під час експлуатації

Для запобігання витоку електроліту, нагрівання й вибуху потрібно дотримуватись таких правил безпеки [48-95]:

- не занурювати акумулятор у воду, зберігати його в сухому прохолодному місці, якщо він не використовується;
- не використовувати і не залишати акумулятор поблизу джерел відкритого вогню або тепла;
- для зарядження використовувати тільки призначені для цього акумулятора зарядні пристрої;
- не підключати акумулятор до пристроїв, не призначених для живлення від нього;
- не кидати акумулятор у вогонь і не нагрівати його;
- не замикати між собою позитивний і негативний виводи акумулятора металевими предметами або дротами;
- не зберігати акумулятор разом з металевими предметами, такими як скріпки або шпильки;
- не зчавлювати, не кидати й не піддавати акумулятор механічним впливам;
- не паяти акумулятор та не проколювати його гострими предметами.

При циклах заряд-розряд Li-ion акумуляторів серед можливих механізмів зниження ємності найчастіше розглядаються такі:

- руйнування кристалічної структури катодного матеріалу (особливо LiMn_2O_4);
- розшарування графіту;
- нарощування плівки на обох електродах призводить до зниження активної поверхні електродів і блокування дрібних пор;
- осадження металевого літію;
- механічні зміни структури електрода в результаті об'ємних коливань активного матеріалу при циклах заряд-розряд.

Тільки точне виконання рекомендованих умов експлуатації виробника електричної батареї забезпечить безперервний прогнозований час автономної роботи пристрою.

Недотримання цих вимог може призвести до виникнення аварійних ситуацій, тому при експлуатації літій-полімерних батарей (ЛПАБ) необхідно враховувати наступні чинники:

- Літій – хімічно активний елемент. Він у чистому вигляді відсутній при експлуатації у сучасних акумуляторах, однак при нештатних ситуаціях може виділятися на внутрішніх електродах акумулятора, що в певних випадках може призвести до займання і вибуху.

Контрольні питання до розділу 5

1. Опишіть конструкцію літій-іонних акумуляторної батареї.
2. Який принцип роботи літій-іонних акумуляторної батареї?
3. Які особливості зарядних характеристик літій-іонних акумуляторної батареї
4. У чому переваги літій-іонних акумуляторної батареї?
5. Які недоліки літій-іонних акумуляторної батареї?

РОЗДІЛ 6 ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЗАРЯДУ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

6.1 Принципи побудови зарядних пристроїв

Зарядні пристрої (ЗП) це зовнішнє електричне обладнання, яке підключається до мережі змінного струму і під'єднується до акумулятора за допомогою спеціальних затискачів. Автомобільні зарядні пристрої можна використовувати як для повного, так і часткового заряджання свинцево-кислотних акумуляторів [93].

Особливості зарядних пристроїв та їх відмінність від пускових пристроїв

Існують трансформаторні та імпульсні зарядки. В нашому каталозі представлені трансформаторні зарядні пристрої, що відрізняються по своїм характеристикам – вони підходять для заряджання батарей будь-якої ємності.

Трансформаторні зарядні пристрої для акумуляторів

Головна деталь такого пристрою – трансформатор, який відповідає за необхідний рівень робочої напруги. В ньому також встановлений випрямляч струму, що перетворює постійний струм із змінного. На виході пристрій видає необхідну для акумулятора постійну напругу, відслідковувати яку можна за допомогою встановленого на корпусі ЗП амперметра.

Завдяки простому принципу роботи та конструкції, трансформаторні зарядні пристрої надійні, рідко ламаються та потребують мінімального догляду. Їх вартість нижча, ніж у більш складних зарядок імпульсного типу.

Відмінність від пускових та пуско-зарядних пристроїв

Від пускових пристроїв (ПП) ЗП відрізняються тим, що видають меншу кількість електричного струму. Якщо пускові та пуско-зарядні пристрої здатні подавати в авто пусковий струм, якого вистачає для запуску, то зарядного струму зарядних пристроїв вистачає тільки для зарядження банок акумулятора.

Для малопотужних акумуляторів і заряду при постійній напрузі можна використовувється пристрій, показаний на рис. 6.1 [3]. Для підтримки постійної вихідної напруги, значення якого встановлюється резистором R_2 , застосовується трививідний інтегральний стабілізатор напруги, наприклад *KP149EH5A*.

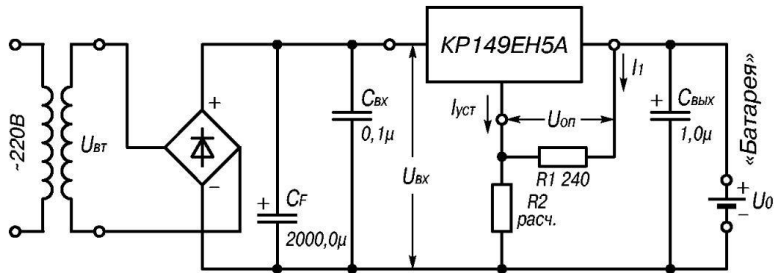


Рисунок 6.1 – Схема зарядного пристрою з постійною вихідною напругою (режим плаваючого заряду)

Можливо використовувати у якості резистору $R2$ змінний резистор, але з обов'язковим шунтуванням постійним резистором (для блокування деренчання движка резистору) таким чином, щоб їхній сумарний опір дорівнював розрахунковому. За його допомогою підтримується необхідна вихідна напруга й одночасно здійснюється захист схеми від струму короткого замикання.

На рис. 6.2 показаний зарядний пристрій із джерелом струму й автоматичним обмеженням напруги. Цей пристрій підтримує постійний струм заряду і відключає акумулятор від зарядного пристрою при досягненні встановленої напруги заряду. Тут джерело струму виконане на транзисторі $VT2$ світлодіоді $VD1$, що виконує функцію індикатора (напруга емітер-база транзистора $VT2$, що задає струм джерела струму, визначається спаданням напруги на світлодіоді). Транзистор $VT1$ обмежує напругу на навантаженні, закриваючи протікання струму через світлодіод $VD1$ по досягненні напруги заряду акумулятора, що встановлюється підбором резистора $R1$. При номіналах, зазначених на схемі, напруга заряду акумулятора $12B$ при максимальному струмі порядку $100mA$. Світлодіод показує ступінь заряду акумулятора. При цілком зарядженому акумуляторі він гасне [96].

Такі зарядні пристрої не вимагають приладів виміру струму і напруги, контролю закінчення заряду і наприкінці заряду автоматично зменшують струм, надаючи акумуляторові максимально можливий заряд. При необхідності заряджати акумуляторні батареї великої ємності (наприклад автомобільні) струм заряду неважко збільшити до $5A$. У цьому випадку транзистор $VT2$ необхідно замінити складеним транзистором рис. 6.7, забезпечивши останній з них тепловідводом [3].

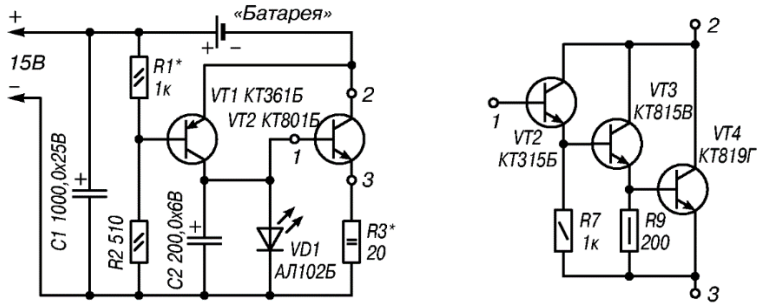


Рисунок 6.2 – Схема автоматичного зарядного пристрою (режим плаваючого заряду)

На рис. 6.3 представлена схема заряду акумуляторів асиметричним струмом (співвідношення зарядної і розрядної складової струму 10:1 і відношення довжин імпульсів цих складових 1:2), що розрахована на роботу з 12 В акумулятором і забезпечує імпульсний зарядний струм 5 А і розрядний – 0,5 А [3]. Вона являє собою регулятор струму, зібраний на транзисторах VT1...VT3. Живиться пристрій змінним струмом напругою 22 В (амплітудна напруга 30 В). При номінальному зарядному струмі напруга на зарядженому акумуляторі змінюється в межах 13...15 В (середня напруга 14 В) [97].

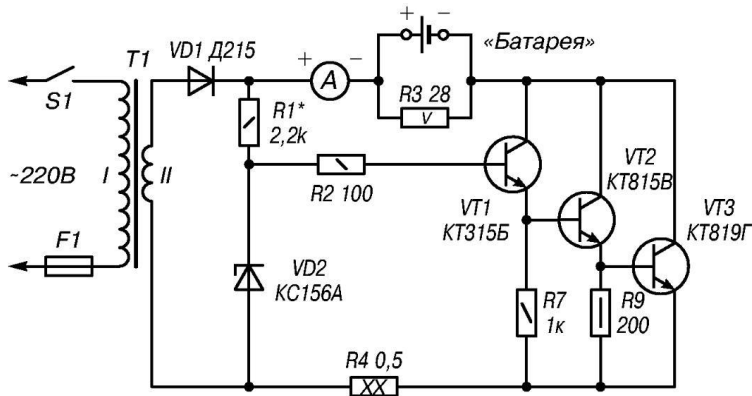


Рисунок 6.3 – Схема заряду акумулятора асиметричним струмом

За час одного періоду змінної напруги формується один імпульс зарядного струму. У проміжку між зарядними імпульсами

формується розрядний імпульс через резистор R_3 , підбором якого встановлюється амплітуда розрядного струму.

Необхідно враховувати, що сумарний струм зарядного пристрою повинний дорівнювати 1,1 від струму заряду акумулятора, тому що при заряді резистор R_3 підключений паралельно акумуляторові.

6.2 Зарядні пристрої свинцево-кислотних акумуляторних батарей

Експлуатація до зберігання полузаряджених акумуляторів – одна з головних причин скорочення їх терміну служби. Що знаходиться на зберіганні заряджений акумулятор через деякий час в результаті саморазрядки переходить в полузаряджене стан. У нових свинцевих і мініатюрних нікель-кадмієвих акумуляторів саморазрядка дорівнює 0,5 ... 2% їх ємності на добу, а у колишніх в експлуатації – істотно вище. Для збільшення терміну служби акумуляторів слід їх постійно підтримувати в повністю зарядженому стані, компенсуючи саморазрядка порівняно невеликим струмом від малопотужного зарядного пристрою. Оптимальним прийнято вважати такий режим зарядки, коли, зарядний струм чисельно дорівнює 0,1 від номінальної ємності акумулятора. Проте, зараз деякі заводи-виробники акумуляторів з метою збільшення терміну їх служби рекомендують двадцятигодинної режим зарядки струмом, чисельно рівним 5% номінальної ємності. Інакше кажучи, зарядка акумулятора струмом, істотно меншим оптимального, сприятливо позначається на терміні його служби, але вимагає відповідно більшого часу. Таким чином, в ряді практичних випадків складні і важкі зарядні пристрої, часто забезпечені автоматичним управлінням, можуть бути замінені простими, малогабаритними і економічними. Одне з таких пристроїв описано нижче. Його можна використовувати для дозарядки автомобільних акумуляторних батарей ємністю до 100 А·год, для зарядки в режимі, близькому до оптимального, мотоциклетних батарей, а також (при нескладній доробки) в якості лабораторного блоку живлення.

Якщо зарядний струм зменшився, то пристрій плавно переходить в режим джерела напруги. Це дає можливість використовувати зарядний пристрій в якості малопотужного лабораторного блоку живлення. При струмі навантаження менше 0,3 А рівень пульсації на робочій частоті перетворювача не перевищує 16мВ, а вихідний опір джерела зменшується до кількох Ом.

Зарядний пристрій легко розміщується в коробку розмірами 155x80x70 мм. Коробку слід виготовляти з ізоляційного матеріалу.

При необхідності використання пристрою для зарядки малогабаритних акумуляторів ємністю до одиниць ампер-годин і регенерації гальванічних елементів доцільно забезпечити регулювання струму зарядки. З достатньою для практики точністю максимальний струм зарядки – струм замикання вихідний мети – пропорційний ємності баластного конденсатора (при 4 мкФ струм дорівнює 0,46 А) [99].

6.3 Зарядні пристрої нікель-кадмієві акумуляторних батарей

Хоча відомо багато способів ефективної зарядки нікель-кадмієвих (акумуляторних) батарей, описувана схема унікальна тим, що об'єднує майже всі їхні переваги. Так, вона виробляє постійний зарядний струм, значення якого може лежати в діапазоні 0,4-1,0 А. Схема може працювати або від мережі змінного струму 220 В, або від 12-В батареї. Заряджається батарея захищена від перезарядження завдяки автоматичному відключенню схеми при досягненні заданого рівня напруги на батареї. Більш того, цей рівень можна підлаштовувати. Нарешті, схема недорога і захищена від коротких замикань [100].

Якщо батарея розряджена, то напруга на вході інвертується операційного підсилювача U1 буде нижче напруги на неінвертуючий вході, що встановлюється за допомогою потенціометра R1. Внаслідок цього вихідна напруга U1 буде приблизно дорівнює позитивному напрузі харчування, що призведе до відмикання транзистора Q1, а також транзистора Q2, який буде працювати в режимі генератора постійного зарядного струму. Рівень цього струму можна знайти з співвідношення $(V_d - V_{be}) / R_6$, де V_d -напруга між його базою і емітером. Цим струмом, що протікає далі через діод D8, і заряджається Ni-Cd-батарея. При цьому буде горіти світлодіод D7, індичірую тим самим протікання процесу зарядки, і будучи індикатором робочого режиму.

У міру зарядки батареї напруга на ній збільшується, що призводить до зростання напруги на вході, що інвертує U1, поки воно не зрівняється з V_{in} . У цей момент вихідна напруга U1 падає до потенціалу землі, і транзистори Q1 і Q2 замикаються, запобігаючи тим самим перезаряд батареї. Задається граничний рівень вихідної напруги, V_{out} , можна обчислити зі співвідношення $V_{out} = V_{in} (R_7 + R_8) / R_8$.

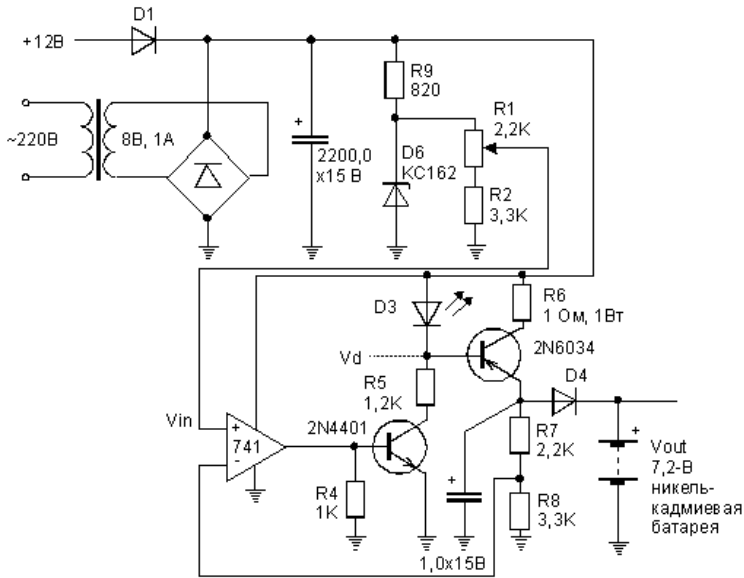


Рисунок 6.4 – Схема зарядного пристрою нікель-кадмієві акумуляторних батарей

За наведених значеннях компонентів схема виробляє зарядний струм 400 мА, який можна змінювати, підбираючи R6 до досягнення максимального значення, рівного 1 А. Задється рівень зарядної напруги слід встановлювати при відключеній батареї.

Діод D8 запобігає розряд у зворотному напрямку в разі відключення мережі або 12-В джерела живлення. Для 7,2-В Ni-Cd-батарей, що задється значення зарядної напруги одно 7,9-8,0 В. Потужний транзистор Q2 слід встановити на великий радіатор [101].

У статті описано "інтелектуальне" зарядний пристрій закордонного виробництва для прискореної зарядки нікель-кадмієвих та нікель-металогідридних акумуляторів, виконане на мікросхемі TEA1101 (Phillips), і його доопрацювання з метою розширення можливостей.

Вже багато років в магазинах і на ринках можна зустріти Ni-Cd (нікель-кадмієві) акумулятори та батареї, які при відповідних умовах експлуатації витримують до 1000 циклів зарядки - розрядки. До недоліків цих акумуляторів відноситься так званий «ефект пам'яті». Полягає він у тому, що використовуваний акумулятор необхідно

доводити до стану повної розрядки (близько 1 В на акумулятор) і тільки тоді починати новий цикл зарядки.

Поряд з широко поширеними нікель-кадмієвих акумуляторами з'явилися і також широко стали застосовуватися відносно нові – Ni-MH (нікель-металогідридні). При тих же габаритах, що і Ni-Cd, ці акумулятори мають майже вдвічі більшу ємність. Природно, вони також дороги і не позбавлені недоліків. У Ni-MH акумуляторів великий внутрішній опір і малі значення пікового струму розрядки, тому вони не призначені для харчування енергоспоживаючих пристроїв, таких як електродрилі, електровивертки, компресори, пиლოსоси і т. Д.

Внаслідок неправильних методів зарядки «життєздатність» акумуляторів скорочується до 30%. Пошкоджені акумулятори, в свою чергу, при утилізації завдають непоправної шкоди навколишньому середовищу. Отже, правильна і грамотна зарядка акумуляторів принесе не тільки принципову фінансову економію, а й надасть позитивний екологічний ефект.

Найдешевші і найпростіші пристрої для зарядки акумуляторів складаються з трансформатора, випрямного діода, струмообмежувального резистора і світлодіода. Трансформатор знижує напруга мережі 220 В до 4 ... 12 В, яке потім випрямляє однополуперіодний випрямляч. Резистор обмежує зарядний струм, а світлодіод сигналізує, що акумулятор підключений до зарядного пристрою. Пристрої в основному виробництва азіатських країн з подібними або ідентичними схемами нерідко можна зустріти в магазинах. Виготовлення таких пристроїв не тягне накладних витрат, проте слід пам'ятати, що вони не захищають акумулятори від перезарядки. Уже через кілька циклів в акумуляторах можуть з'явитися незворотні зміни, що скорочують термін їх служби [102].

Ступінь зарядженості можна контролювати, постійно вимірюючи температуру корпусу акумулятора. Цей метод заснований на так званому негативному температурному коефіцієнті (близько -1 мВ / °С) Ni-Cd і Ni-MH акумуляторів. Зарядку припиняють при відповідному значенні температури, яке розраховують для кожного конкретного випадку. Однак цей метод не має широкого поширення, беручи до уваги труднощі, які виникають при спробах точного вимірювання температури і необхідності ведення точних розрахунків.

Є ще один спосіб контролю повної зарядки акумулятора, заснований на обнар ловлі зменшення напруги, в літературі його часто називають метод ΔV [1-6]. Він полягає у відстеженні зміни напруги на висновках акумулятора в часі і припинення зарядки в момент

досягнення максимуму характеристики. Саме цей метод – вимірювання знака ΔU – і лежить в основі принципу роботи пристрою, про який піде мова далі.

Значення ΔV , яке в змозі виміряти зарядний пристрій, залежить від застосовуваної мікросхеми, а точніше, від розрядності вбудованого в неї аналого-цифрового перетворювача, що перетворює напругу в цифровий код. У мікросхемі TEA1101 число розрядів дорівнює 12, що забезпечує дискретність в 0,025% від абсолютного значення напруги. Цього достатньо для акумуляторів обох типів, в той час як, наприклад, мікросхема TEA1100 має всього лише 10-розрядний АЦП, точності якого вистачить тільки для роботи з Ni-Cd акумуляторами [103].

Схема «інтелектуального» зарядного пристрою показана на рис. 6.5. Позичинні позначення всіх елементів відповідають схемі фірми-виробника.

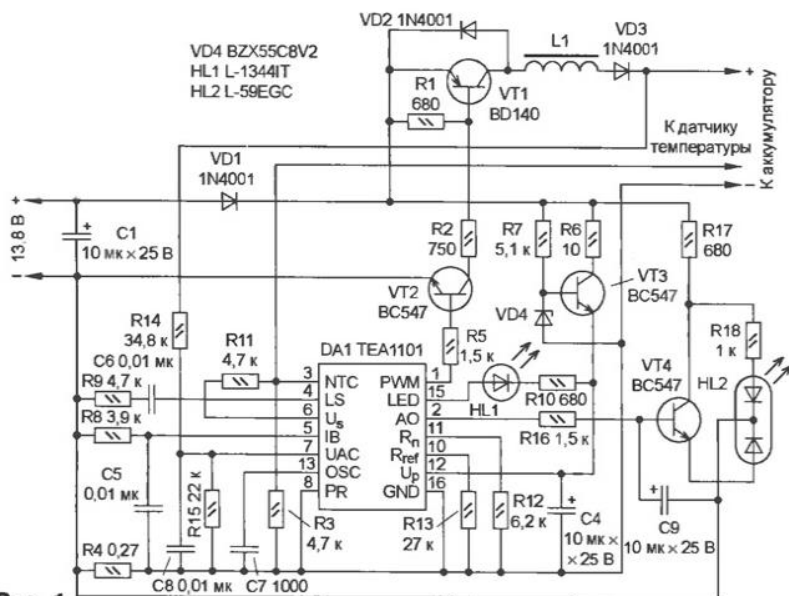


Рис. 1 Рисунок 6.5 – Схема «інтелектуального» зарядного пристрою нікель-кадмієві акумуляторних батарей

Основа пристрою – спеціалізована мікросхема TEA1101 (DA1). Напруга живлення мікросхеми стабілізує стабілізатор

VT3VD4R6R7 на рівні 8 В, проте вона зберігає працездатність до напруги 11,5 В. На вхід ІВ мікросхеми надходить напруга, пропорційне зарядного струму акумулятора, з датчика струму - резистора R4, яке порівнюється з заданими значеннями струму прискореної і консервативної зарядки, обумовленими відповідно резисторами R13 і R12. У разі відхилення зарядного струму від заданого значення на виході аналогового управління АТ виникає напруга, що управляє Якщо в зарядному пристрої застосований лінійний регулятор, то це напруга надходить на регулюючий транзистор, який і здійснює корекцію. Однак в мікросхемі TEA1101 є вбудований широтно-імпульсний модулятор і відповідно вихід широтно-імпульсного управління PWM [104].

6.4 Зарядні пристрої літій-іонних акумуляторних батарей

Однак всі ці пристрої розроблені для Ni-Cd і Ni-MH акумуляторів і мало придатні для зарядки Li-ion (літій-іонних) акумуляторів через їх специфічних особливостей. В опублікованій статті описано нескладне зарядний пристрій, призначений для зарядки саме таких акумуляторів.

Незважаючи на велику кількість інформації по Li-ion акумуляторів, Інтернет переповнений призначеними для користувача спорами, що свідчать про потребу в досить простому і надійному пристрої для їх зарядки. Пропонована конструкція - всього лише один з можливих варіантів вирішення цього завдання, орієнтований, перш за все, на дешевизну його виготовлення. На відміну, наприклад, від пристрою, описаного в [1], вартість використаних в ньому мікросхем не перевищить 1 дол. США.

Звичайно, існують показники, якими на догоду дешевизні нехтувати ні в якому разі не слід. Головний з них - безпека експлуатації, що стала "фігурантом" радіоаматорських байок про вибухи Li-ion акумуляторів при недбалому експериментуванні з ними. В [2] досить докладно розказано про заходи, що вживаються фірмами щоб уникнути ненавмисного руйнування літєвих заряджаються елементів живлення. Проте виробники попереджають про неприпустимість їх розрядки до напруги менше 2,5 В або великими (більше 2,5 А) струмами, а також перезарядки. Як глибока розрядка, так і тривала зарядка струмом навіть всього кілька мікроампер здатні стимулювати утворення на електродах акумулятора дендритів і зумовити його передчасний вихід з ладу. Тому сам собою напрашується висновок: для продовження "життя" Li-ion акумулятора краще своєчасно (не чекаючи зниження напруги до 2,5 В)

(за схемою) висновок напруга 1,24 В від стабілізованого джерела живлення.

Відбувається це в такий спосіб. При натисканні кнопки SB1 на базу транзистора VT2 подається (через резистори R15, R16) напруга позитивної полярності і він відкривається. В результаті спрацьовує реле K1 і своїми контактами K1.1 підключає акумулятор до зарядної ланцюга. Оскільки і при кондиціонуванні, і при зарядці великим струмом компаратор DA3.2 включає світлодіод HL2 і випромінюючий діод оптрона U1, що відкрився фототранзистор під'єднує резистор R14 до шини харчування +7 В, після чого натиснуту кнопку SB1 можна відпустити.

Світіння HL2 дозволяє судити про надійність з'єднання пристрою з акумулятором: якщо якість контактів погане (перехідний опір велике), він не горить. У цьому випадку реле після відпускання кнопки повертається у вихідне положення, відключаючи акумулятор від зарядного ланцюга.

Якщо ж опір контактів досить мало, зарядка протікає за описаним алгоритмом. При зниженні струму на фінальній стадії і спробі компаратора створити «брязкіт» відпускання реле викликає від'єднання акумулятора від зарядного ланцюга і підключення замість нього світлодіода HL3 з струмообмежувальним резистором R18. Світіння HL3 сигналізує про закінчення зарядки. Конденсатор C4 в базовій ланцюга транзистора VT2 – помехоподавляючий.

Щоб не витратити даремно ресурс Li-ion акумулятора, як навантаження при налагодженні пристрою рекомендується використовувати батарею з двох-трьох Ni-Cd акумуляторів ємністю 0,5 ... 1 А·год, яку на першому етапі підключають безпосередньо до катода VD1, минаючи контактну групу реле. Якщо ретельно виконати рекомендації щодо попереднього встановлення двигунів підлаштування резисторів R7, R10, R11, налагодження пристрою може навіть не знадобитися, але перевірити основні показники (струм кондиціонування, порогове напруга включення повного струму зарядки, його початкове значення, кінцеве напруга на заряджає акумулятор, значення на дисплеї струму закінчення зарядки) все ж необхідно [106].

На час налагодження до зарядної ланцюга підключають цифровий вольтметр і амперметр на 1 А, а замість Li-ion акумулятора – батарею з двох виряджених до 1 В Ni-Cd елементів. Після подачі напруги живлення 7 В повинен включитися режим кондиціонування. Необхідний струм (0,1 А) встановлюють підбором резистора R6. У міру

зарядки напруга на батареї буде рости, і як тільки воно стане рівним 2,5 В, зарядний струм повинен збільшитися до 1 А. При необхідності це значення струму встановлюють підлаштування резистором R7, а щоб його зміна відбувалося при напрузі 2,5 В, коректують положення движка резистора R11.

Контрольні питання до розділу 6

1. Опишіть пристрої для заряду акумуляторних батарей.
2. Який принцип побудови зарядних пристроїв?
3. Які особливості зарядних пристроїв нікель-кадмієві акумуляторних батарей
4. У чому особливості пристроїв літій-іонних акумуляторних батарей?
5. У чому особливості пристроїв стартерних акумуляторних батарей?

РОЗДІЛ 7 АЛЬТЕРНАТИВНІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

6.1 Воднева енергетика та перспективи її розвитку

Воднева енергетика передбачає використання водню або водневмісних з'єднань для виробництва енергії, яка буде використовуватися з високою енергоефективністю, величезними екологічними і соціальними перевагами, а також буде мати економічну конкурентоспроможність. В даний час світ експериментує із застосуванням водневої енергетики у всіх секторах, включаючи виробництво, зберігання і розподіл енергії; електропостачання, опалення та охолодження будинків і домашніх господарств; промисловість; транспорт; і виробництво сировини.

Енергоефективність та стійкість є двома важливими факторами, що сприяють переходу від нинішньої економіки, що базується на викопному паливі, до економіки замкнутого циклу, яка буде характеризуватися високоефективною інженерією і застосовувати найпередовіші енергетичні технологічні рішення нинішнього століття.

Водень – це чисте паливо, яке при використанні в паливному елементі виробляє тільки воду. Водень можна отримувати з різних джерел, таких як природний газ, атомна енергія, біомаса і відновлювані джерела енергії (наприклад, сонячна і вітрова). Ці фактори роблять його привабливим варіантом в якості палива для транспорту і виробництва електроенергії. Його можна використовувати в автомобілях, в будинках, в портативних джерелах живлення і в багатьох інших сферах. Водень – це потенційний носій енергії, який можна використовувати для зберігання, транспортування і доставки енергії, виробленої з інших джерел.

Водень і енергія мають довгу спільну історію – понад 200 років тому він використовувався в перших двигунах внутрішнього згорання і став невід'ємною частиною сучасної нафтопереробної промисловості. Водень легкий, придатний для зберігання, енергоємний і не виробляє прямих викидів забруднюючих речовин або парникових газів.

Потенціал водню, виробленого за допомогою низьковуглецевої електроенергії, як джерела чистої енергії, – величезний. Він простягається від транспорту до цілого ряду галузей обробної промисловості, а також від зберігання електроенергії з низьким вмістом вуглецю до використання водню для опалення житлових і комерційних будівель. Але для того, щоб водень вніс значний вклад в перехід до

чистої енергії, його необхідно впровадити в ключових секторах економіки.

Водень успішно використовують як сировину вже багато років. Загальна оціночна вартість ринку сировини водню – 115 млрд дол. США і, як очікується, вона буде тільки зростати, досягнувши до 2022 року 155 млрд дол. США. В наші дні водень широко застосовують у різних галузях і секторах (рис. 20).

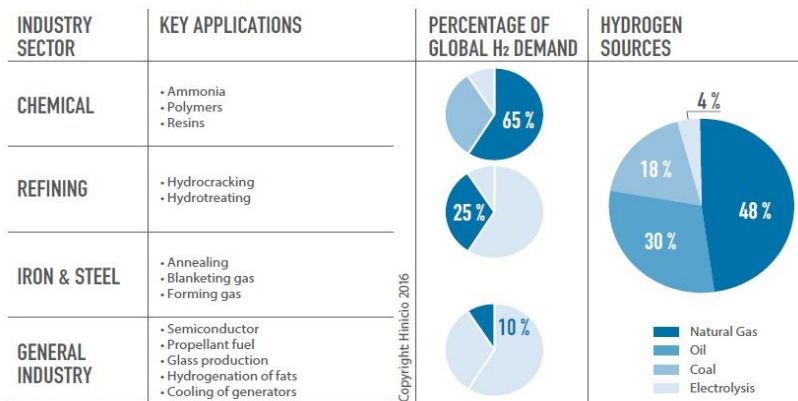


Рисунок 7.1 – Світовий попит і джерела виробництва водню. Джерело: IRENA, Hydrogen from renewable power

Водень і електрика доповнюють один одного. Водень може полегшити інтеграцію електроенергії в усі сектори кінцевого споживання (Рис. 7.2).

Водень можна отримати, використовуючи ряд процесів (Рис. 7.3.). Наприклад, його можна виділити з органічних матеріалів, таких як викопне паливо і біомаса, термохімічним способом. Або за допомогою електролізу розщепити воду (H₂O) на водень (H₂) і кисень (O₂). Також добути його можна за допомогою бактерій і водоростей (біологічні процеси). Далі – більш докладно про кожен зі способів.

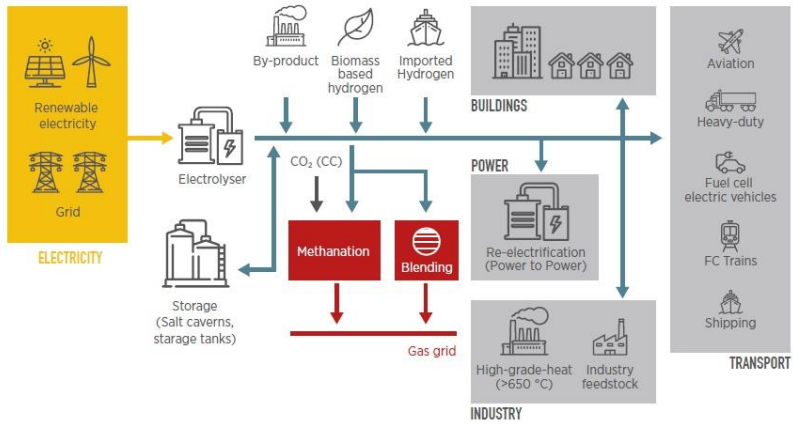


Рисунок 7.2 – Інтеграція змінної відновлюваної енергії в усі сектори кінцевого споживання за допомогою водневого акумулювання

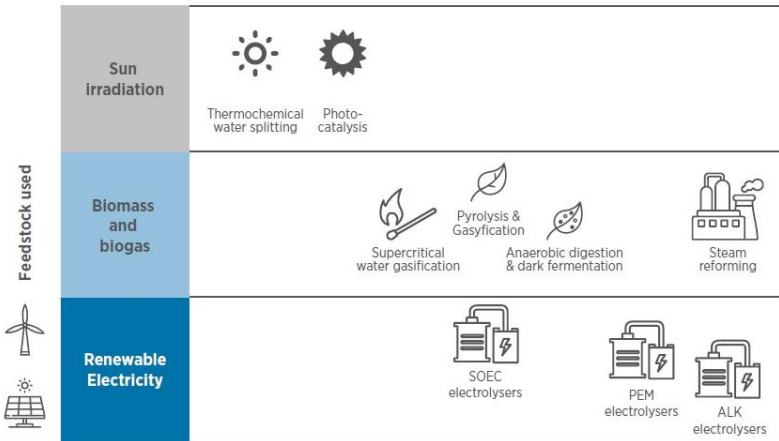


Рисунок 7.3 – Джерела і шляхи отримання відновлюваного водню

Термохімічний спосіб

Деякі теплові процеси використовують енергію з різних ресурсів, таких як природний газ, вугілля або біомаса, щоб добути водень із їхньої молекулярної структури.

Низькі ціни на газ на Близькому Сході та Північній Америці породжують одні з найнижчих витрат на виробництво водню.

Імпортери газу, зокрема Японія, Корея, Китай та Індія, змушені боротися з більш високими імпортними цінами на газ, що призводить до збільшення витрат на виробництво водню (рис. 7.4).

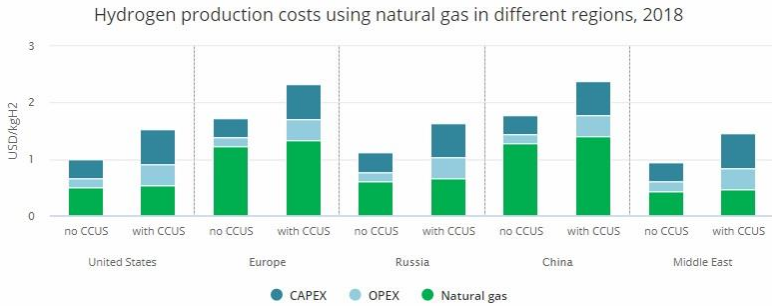


Рисунок 7.4 – Витрати на виробництво водню з використанням природного газу в різних регіонах. Джерело: The Future of Hydrogen Seizing today's opportunities, IEA, 2019.

Серед існуючих термохімічних процесів розрізняють [60]:

– Перетворення природного газу, або парова конверсія метану. Природний газ містить метан, який можна використовувати для виробництва водню. При паровій конверсії метан реагує з парою під тиском 3-25 бар у присутності каталізатора з утворенням водню, оксиду вуглецю і відносно невеликої кількості вуглекислого газу.

– Газифікація вугілля – один із методів, за допомогою якого можна виробляти електроенергію, рідке паливо, хімікати та водень. Зокрема, водень отримують шляхом першої реакції вугілля з киснем і паром при високому тиску і температурах із утворенням суміші, що складається в основному з монооксиду вуглецю та водню.

– Газифікація біомаси – процес, при якому органічні або викопні вуглецеві матеріали перетворюються при високих температурах (> 700 °C), без спалювання, з контрольованою кількістю кисню і/або пари в оксид вуглецю, водень і діоксид вуглецю.

– Рідке перетворення на основі біомаси. Рідини, отримані з ресурсів біомаси, включаючи етанол і біомасло, можуть бути перетворені для виробництва водню в процесі, аналогічному перетворенню природного газу.

– Сонячний термохімічний водень. При термохімічному розщепленні води використовують високі температури (від концентрованої сонячної енергії або від непотрібного тепла ядерно-

енергетичних реакцій) та хімічні реакції для виробництва водню й кисню.

Електролітичний спосіб

Електролізери використовують електрику для розщеплення води на водень і кисень. Ця технологія добре розроблена і комерційно доступна. Різні електролізери працюють по-різному, в основному через різного типу матеріали електроліту. Виділяють полімерні електролітичні мембранні, лужні, тверді оксидні електролізатори.

Процеси прямого сонячного розщеплення води

Метод фотолізу використовують для розщеплення води на водень і кисень за допомогою сонячної енергії. В даний час метод знаходиться на ранній стадії дослідження і ділиться на:

– фотоелектрохімічний – водень виробляють з води з використанням сонячного світла і спеціалізованих напівпровідників, званих фотоелектрохімічними матеріалами, які використовують світлову енергію для прямої дисоціації молекул води на водень і кисень (це тривалий технологічний шлях із потенціалом зниження викидів парникових газів або їхньої відсутності);

– фотобіологічний – для отримання водню використовують мікроорганізми і сонячне світло.

Біологічні процеси. Бактерії та мікрободорості можуть виробляти водень за допомогою біологічних реакцій, використовуючи сонячне світло або органічні речовини. Розрізняють конверсію мікробної біомаси (здатність мікроорганізмів споживати і перетравлювати біомасу і виділяти водень) і фотобіологічний процес.

7.2 Сучасні способи отримання водню в умовах транспортної інфраструктури

Бельгія

Інженери з Бельгії стверджують, що сонячні батареї можуть не тільки виробляти електрику, а й газоподібний водень, дозволяючи обігрівати будинки, при цьому не збільшуючи викиди вуглекислого газу.

Дослідники з Левенського католицького університету (KU Leuven) розробили панель, яка використовує для вироблення водню сонячну енергію та вологість повітря. Дослідна панель може виробляти 250 літрів газоподібного водню в день (рис. 7.5). Прототип забирає водяну пару і розщеплює її на молекули водню і кисню. Дослідники планують провести польові випробування свого дітища в одному з будинків у містечку Ауд-Хеверле. Протягом літніх місяців водень буде

зберігатися під землею в невеличкій посудині під тиском, а потім перекачуватися по всьому будинку протягом зими. Якщо все піде за планом, команда встановить ще 20 панелей неподалік, щоб інші сім'ї також могли використовувати зелений (тобто екологічно чистий) водень [61].



Рисунок 7.5 – Сонячна панель розщеплює воду для виробництва водню. Джерело: Solar Panel Splits Water to Produce Hydrogen, <https://spectrum.ieee.org>, Mar'19.

Японія

Японські дослідники з Національного інституту матеріалознавства, Токійського університету й Університету Хіросіми провели спільний техніко-економічний аналіз виробництва водню з фотоелектричної енергії з використанням електролізера на батарейках.

Результати цього дослідження дозволили припустити, що вартість водню становить від 17 до 27 ієн/м³ (від 0,16 до 0,25 дол. США). Спільна дослідницька група розробила інтегровану систему, здатну регулювати кількість заряду/розряду батареї та кількість вироблюваного електролізом водню залежно від кількості вироблюваної сонячної енергії. Потім команда оцінила економічну

доцільність системи (Рис. 7.6.). Очікується, що до 2030 року з'являться акумуляторні батареї, які будуть розряджатися з низькою швидкістю.

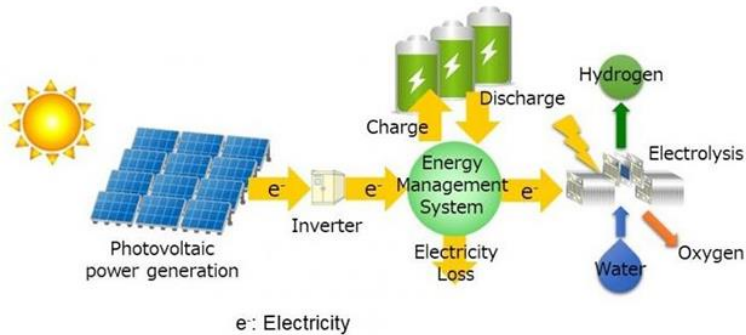


Рисунок 7.6 – Система здатна регулювати кількість заряду/розряду батареї та кількість вироблюваного електролізом водню залежно від кількості виробленої сонячної енергії

Австралія

Колишній автомобільний завод Toyota біля Мельбурна незабаром стане комерційним місцем виробництва та заправки воднем.

Австралійське агентство з відновлюваних джерел енергії (ARENA) внесе 3,1 млн дол. США, щоб допомогти в створенні Toyota Australia Hydrogen Center. Загальна вартість центру – 7,4 млн доларів. Згідно з ARENA, центр буде використовувати сонячні фотоелектричні батареї та акумулятори для виробництва водню. Водень будуть виробляти за допомогою електролізу, а потім стискати його в паливні елементи. Toyota Australia Hydrogen Center буде також включати освітній центр і першу інфраструктуру для заправки воднем комерційних транспортних засобів.

Норвегія

Близько 97% норвезької електроенергії виробляється гідроелектростанціями, і в даний час є 15 кВт·год надлишкової потужності, тому необхідні нові способи використання цієї зеленої енергії. У вигляді водню надлишки і вловлені ВДЕ можна зберігати, розподіляти і робити доступними для зростаючих ринків із нульовим рівнем викидів як в Норвегії, так і за кордоном [62].

США

У США провели дослідження: розробили спрощену модель для визначення та оптимізації теплових і економічних характеристик

побутових фотоелектричних систем із електролізером, або з фіксованими панелями, або з панелями стеження за сонцем з використанням річного сумарного сонячного випромінювання на горизонтальній поверхні і кліматичних даних. Вибрали 12 місць із чотирьох кліматичних зон (тропічно-субтропічний, сухий, помірний, прохолодно-сніговий). Моделювання було проведено для отримання даних про виробництво водню для різних місць, а отримані дані зіставлені для отримання виробництва водню в фотоелектричній системі в кг/кВт/год залежно від загального річного сонячного випромінювання на горизонтальній поверхні. Встановлено, що виробництво водню з фіксованими фотоелектричними панелями варіюється від 26 до 42 кг/кВт/год і має вартість від 25 до 268 \$/ГДж.

Швейцарія

25 вересня 2019 року Гесгенська гідроелектростанція (Alprik Gösgen) сформувала епіцентр логістики з нульовим рівнем викидів на один день: Hydrospider AG і Hyundai Hydrogen Mobility (ННМ) представили бізнес-модель, засновану на зеленому водні, яка не має аналогів у Європі.

Планується, що до 2025 року 1600 швейцарських електромобілів Hyundai на паливних елементах будуть перевозити вантажі з зеленим воднем. Перша швейцарська установка з виробництва водню в промисловій експлуатації нині будується на Гесгенській ГЕС. З кінця 2019 року електролізна установка Hydrospider AG потужністю 2 МВт буде виробляти водень для перших приблизно 50 електромобілів на паливних елементах, які будуть поставлені в Швейцарію в 2020 році.

Як видно з графіка нижче, з 1975 року попит на водень виріс більше ніж утричі, і продовжує зростати: майже повністю постачається з викопного палива, причому 6% світового природного газу і 2% світового вугілля йде на виробництво водню.

Зі зменшенням витрат на відновлювану електроенергію, зокрема від сонячної фотоелектричної енергії та вітру, інтерес до електролітичного водню зростає, і останніми роками було реалізовано кілька демонстраційних проєктів. Виробництво всієї виділеної сьогодні енергії водню з електроенергії призведе до споживання електроенергії в 3600 ТВт*год, що більше, ніж загальний річний обсяг виробництва електроенергії в Європейському союзі.

Зі зменшенням витрат на сонячне фотоелектричне і вітрове виробництво, будівництво електролізерів у місцях із відмінними умовами використання ВДЕ може стати недорогим варіантом постачання водню, навіть після врахування витрат на передачу і

розподіл транспорту водню з (часто віддалених) місць відновлюваних джерел енергії кінцевим користувачам (Рис.7.7) [62].

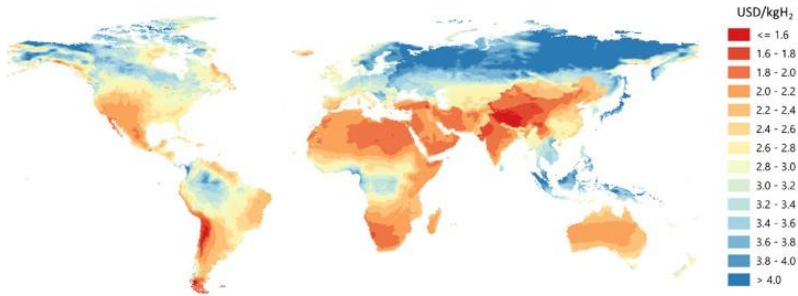


Рисунок 7.7 – Витрати на водень від гібридних сонячних фотоелектричних і наземних вітрових систем у довгостроковій перспективі

Сьогодні переважає використання водню в промисловості, а саме: переробка нафти, виробництво аміаку, виробництво метанолу та виробництво сталі. Практично весь цей водень поставляється з використанням викопного палива, тому існує значний потенціал скорочення викидів за рахунок чистого водню.

У транспорті конкурентоспроможність автомобілів на водневих паливних елементах залежить від вартості паливних елементів і заправних станцій, в той час як для вантажних автомобілів пріоритетним завданням є зниження вартості доставки водню. Судноплавство і авіація мають обмежені можливості використання низьковуглецевого палива і відкривають можливості для палива на основі водню.

У нерухомості водень може бути використаний за рахунок його додавання в існуючі мережі природного газу з найбільшим потенціалом в багатоквартирних і комерційних будівлях, особливо в густонаселених містах, в той час як більш довгострокові перспективи можуть включати пряме використання водню в водневих котлах або паливних елементах.

У виробництві електроенергії водень є одним з перспективних варіантів для зберігання відновлюваної енергії, а водень і аміак можна використовувати в газових турбінах для підвищення гнучкості

енергосистеми. Аміак можна також використовувати на вугільних електростанціях для скорочення викидів.

Вважається, що воднева енергія, яка є повністю незалежною від будь-яких потреб у вуглі, добре поєднується з відновлюваними або невичерпними енергоресурсами, до яких ми повинні поступово перейти в майбутньому в міру того, як наш вік викопного палива йде на спад. З усіх відновлюваних джерел енергії сьогодні єдиним надійним джерелом є сонце, хоча контрольований ядерний синтез і геотермальні енергетичні системи також мають великі перспективи.

Водень може дозволити відновлювальним джерелам енергії внести ще більший внесок у загальну картину світової енергетики. Він може допомогти з вирішенням проблеми змінної продуктивності відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна фотоелектрична енергія і вітер, доступність яких не завжди відповідає попиту. Водень є одним з провідних варіантів зберігання енергії з відновлюваних джерел і виглядає багатообіцяючим варіантом з найменшими витратами для зберігання електроенергії протягом декількох днів, тижнів або навіть місяців. Водень і паливо на основі водню можуть транспортувати енергію з відновлюваних джерел на великі відстані – з регіонів з значними сонячними і вітровими ресурсами в енергоємні міста за тисячі кілометрів [63].

Акумуляція енергії у надпровідниках

Накопичення електроенергії відбувається у вигляді магнітного поля, що виникає під час руху постійного струму в замкнутій котушці з надпровідника. Котушка криогенно охолоджується до температур, що зумовлюють явище надпровідності. Типова система складається з трьох частин: надпровідної котушки, системи перетворення електрики в постійний/змінний струм та криогенних холодильних машин.

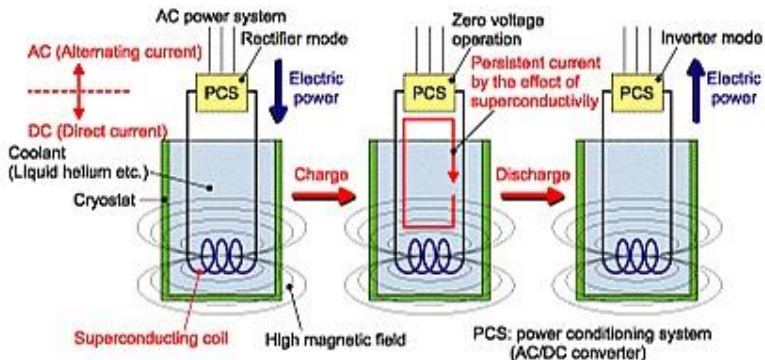


Рисунок 7.8 – Акумуляція енергії у надпровідниках

Сучасні технології накопичення електроенергії

Технологія Powerwall and Powerpack

Tesla поступово стає одним зі світових лідерів в області створення систем зберігання енергії. На сьогоднішній день Tesla просуває на ринку два різновиди таких систем: Powerwall та Powerpack. Перша може використовуватися в житлових і невеликих офісних приміщеннях, друга – для роботи на підприємствах, вона здатна працювати з великими потужностями і для великої кількості споживачів.

«Домашня» Powerwall має кілька різновидів – 7 кВт (вартість 3 тис. доларів), 10 кВт (вартість 3,5 тис. доларів) і 14 кВт (вартість 5,5 тис. доларів, ємності такого акумулятора вистачить на добу для енергозабезпечення будинку з двома спальнями). Окремо доведеться сплатити близько 1500 – 1600 доларів за установку, інвертори та інші витратні матеріали. Габаритні розміри становлять близько метра в ширину і довжину, товщина – близько 18 см, вага — 100 кг. Підзарядка акумулятора можлива як від вітрогенератора або сонячної батареї, так і від побутової мережі. Powerwall може бути встановлена всередині або зовні будинку, допустима температура експлуатації – від -20 до +43 градусів. Гарантія від виробника – 10 років.

Потужність промислової Powerpack становить 100 кВт, але її конструкція дозволяє легко об'єднувати окремі елементи в великі системи потужністю до 100 МВт, що вистачить для енергозабезпечення великого промислового об'єкта. Приблизна вартість складе 250 доларів за 1 кВт [65].

Технологія ZCell

Коли австралійська компанія Redflow заявила про початок продажів домашніх потужних акумуляторних батарей з рідким електролітом, багато фахівців не сприйняли цю інформацію серйозно. Втім, перші зразки, що надійшли в продаж в березні 2016 року отримали позитивні відгуки. Поки компанія Redflow орієнтується на внутрішній австралійський ринок користувачів сонячної енергії.

Постійне зниження «зеленого» тарифу на тлі зростаючих цін на енергоносії роблять батареї з рідким електролітом ZCell все більш привабливими для домашнього господарства. Розроблена австралійськими інженерами система збереження енергії заснована на цинк-бромній акумуляторній батареї ємністю 10 кВт. Накопичуючи енергію від сонячних батарей, вона віддає її в моменти пікового навантаження, а так само у вечірньо-нічний час. Серед переваг можна відзначити [66]:

– максимально допустима глибина розряду становить 100%, при цьому розробники стверджують, що повний розряд ніяк не позначається на ємності батареї і її експлуатаційних характеристиках

– батарея може перебувати розрядженою дуже тривалий час, це ніяк не позначиться на її характеристиках

– ємність батареї практично не змінюється з часом – гарантія на акумулятор 10 років

– в батарею вбудована власна система електрозахисту, крім того, існуючий інтерфейс дозволяє контролювати і управляти роботою системи дистанційно, використовуючи Інтернет

– простота встановлення – система поставляється у вигляді моноблока, який просто необхідно поставити всередині або зовні будинку і підключити до мережі

– екологічна безпека – все елементи акумулятора підлягають вторинній переробці

– за своїми габаритами – це найменша масово випускається батарея з рідким електролітом.

Основні проблеми, на думку фахівців, пов'язані саме з цинк-бромним акумулятором, який дуже ефективний при тривалих циклах накопичення і зберігання енергії, але при цьому не дуже виправданий при коротких циклах заряд-розряд. Крім того, більшість користувачів звикли орієнтуватися на літій-іонні акумулятори, що робить подальшу комерціалізацію ZCell досить проблематичною, особливо за межами Австралії.

Технологія SonnenCommunity

Компанія Sonnen – безсумнівний лідер німецького ринку побутових систем зберігання енергії, на сьогоднішній день компанія реалізувала більше 10 тисяч домашніх систем. Sonnen представляє акумуляторні батареї ємністю від 2 до 16 кВт-год, термін служби – не менше 10 тисяч циклів зарядки/розрядки при максимально допустимій глибині розряду близько 80%. Останнім часом компанія виступає не тільки як виробник обладнання, але й позиціонує себе як постачальник послуг на ринку електроенергетики.

У листопаді 2015 року компанія запустила в Німеччині амбітний проєкт. Платформа SonnenCommunity – це можливість створити віртуальний пул з власників сонячних систем і електричних батарей. Надлишки електроенергії, отриманої сонячними батареями і не використані в побуті, можуть бути розподілені серед учасників віртуальної мережі, наприклад, можуть бути спрямовані на підзарядку акумуляторної системи в іншого власника, а пізніше – реалізовані на

оптовому ринку. З огляду на різке падіння цін на «зелену» електроенергію, це дозволить їй виробникам продавати її в реальному часі в момент, коли ціни будуть найбільш сприятливими. До платформи може підключитися будь-який користувач, який придбав обладнання компанії. Sonnen також використовує нове програмне забезпечення, яке може візуалізувати агреговане зберігання в режимі реального часу [67].

Фахівці розглядають Sonnen як найбільш реального конкурента Tesla – компанія вже продала близько тисячі систем для домашніх сонячних електростанцій. Правда, вартість зберігання енергії в системах Tesla нижче, але в Sonnen наполягають на своїй перевазі по терміну служби і кількості циклів заряд/розряд.

Технологія Smart Towns

В Японії, де щорічно зводиться близько 1 мільйона нових будинків, з 2020 року обов'язковим стане стандарт Zero Energy Homes (ZEH). Panasonic і інші японські фірми, прямі конкуренти «Гігафабріки» Tesla, вже багато років продають місцевим клієнтам готові рішення для домашніх сонячних електростанцій, в яких система зберігання електроенергії поки пропонується як додаткова опція.

Компанія Panasonic реалізує власну програму «розумного» міста, розташованого біля Йокогами. Передбачається, що в межах цього міста всі домашні сонячні електростанції і системи накопичення енергії будуть об'єднані в єдину мережу. Це дозволить не тільки забезпечити енергонезалежність міста, а й в перспективі – вийти на японський оптовий ринок продажу електроенергії.

Panasonic – один з найбільших в світі виробників потужних накопичувальних батарей, великі обсяги виробництва дозволяють компанії реалізовувати продукцію за дуже конкурентною ціною. Smart Towns – молодий, але амбітний проект, в якому Panasonic постарается реалізувати нові підходи в накопиченні і розподілі електричної енергії. При цьому компанія буде спиратися на досвід, набутий недавно в Канаді, де Panasonic реалізувала великий проект «сонячні батареї + акумулятор». Крім того, компанія реалізує кілька проектів по створенню систем зберігання електрики для житлових будинків в Австралії, хоча і зіткнулася там з сильною конкуренцією.

Технологія сірчано-натрієвих батарей

Японська компанія NGK Insulators однією з перших вийшла на світовий ринок систем накопичення та зберігання електрики з технологією сірчано-натрієвих батарей з рідким електролітом. На сьогоднішній день сумарна потужність акумуляторів, встановлених по всій земній кулі NGK Insulators, становить близько 3 ГВт, в тому числі

на основі акумуляторів саме цього типу в Японії створена найбільша в світі мережа накопичувальних батарей. У період з 2007 по 2010 рік на компанію припадало 66% ринку акумуляторів для довготривалого зберігання електрики. Завдяки особливості технології, сірчано-натрієві батареї мають великий термін експлуатації, але при цьому пожежонебезпечні через високу робочу температуру.

Незважаючи на те, що літій-іонні батареї більше підходять для створення масштабних систем зберігання електрики, ніж акумулятори з рідким електролітом, останні ще досить довго будуть зберігати свої позиції в якості альтернативної технології для довготривалого накопичення електроенергії. Наприклад, зовсім недавно компанія виграла тендер на будівництво великої системи акумуляування енергії (35 МВт – 280 МВт) в Італії.

Технологія Intensium li-ion battery

Французька компанія Saft стала одним з головних ньюсмейкерів після того, як вона була придбана нафтовим гігантом Total за 1 мільярд доларів – це сама велика угода для виробників акумуляторів. До зміни власника, компанія брала активну участь в проєктах по всьому світу, створюючи системи зберігання та управління електроенергією на основі літій-іонних батарей власного виробництва. Основну увагу компанія зосередила на проєктах у віддалених районах, де з самого початку високі ціни на електроенергію. Як приклад можна привести установку системи потужністю 1,2 МВт для віддаленого селища на Алясці, велика сонячна електростанція в анахола (Гаваї), а так само недавно отриманий контракт на створення системи накопичення енергії на 10 МВт в Пуерто-Ріко. Фахівці поки обережно коментують зміну власника, відзначаючи, що на перших порах компанія, перш за все, за обсягами продукції, що випускається, не зможе конкурувати з такими визнаними лідерами галузі як LG Chem, Samsung SDI, Tesla і Panasonic.

Технологія Pure Wave S & C

Компанія S & C Electric має більш ніж віковий досвід в проєктуванні і будівництві інженерних комунікацій, захисту і створення систем управління для електричних мереж. На сьогоднішній день S & C Electric – один з лідерів в області інноваційних програмних рішень для підвищення надійності мереж, їх продуктивності і ефективності. Компанія спеціалізується на розробці і впровадженні рішень як для комерційних і виробничих об'єктів, так і приватних будинків, а також автономних систем енергозабезпечення. Приміром, компанія в Техасі об'єднала в єдину мережу 4 електричних

мікромережі, що мають різні джерела генерації електрики – в тому числі і сонячну, а також кілька систем зберігання електрики. Крім того, компанія розробила одну з найбільших систем зберігання електрики в Великобританії. Ще один проєкт потужністю 7 МВт – Half Moon Ventures, в місті Мінстер, штат Огайо.

Технологія Aqueous Hybrid Ion battery

Розроблений Aqueion гібридний іонний акумулятор, який використовує натрій-іонний водний розчин (на основі морської води), повинен стати найбільш екологічно безпечною і чистою батареєю на ринку. Серед інших акумуляторів з рідким електролітом, технологія Aqueion орієнтована, перш за все, на тривале зберігання електроенергії.

Компанія успішно забезпечила фінансування проєкту на ранніх стадіях розробки технології. За розрахунками інженерів компанії, після початку масового виробництва гібридних акумуляторів, їх вартість повинна скласти близько 160 доларів за 1 кВт / год. Але судити про те, наскільки реально ця заява – поки рано. На сьогоднішній день компанії залучила майже 200 мільйонів доларів інвестицій, але при цьому вдалося реалізувати всього кілька комерційних проєктів на основі гібридних акумуляторів. При цьому, всі вони були виконані на ринках, де вартість електроенергії дуже висока, наприклад, в Пуерто-Ріко. Щоб технологія Aqueous Hybrid Ion battery отримала хороші комерційні перспективи, компанії-розробнику варто дуже серйозно попрацювати над скороченням витрат.

Технологія Zinc-iron flow battery

Компанія ViZN – ще один із виробників, що робить ставку на акумулятори великої ємності з рідким електролітом. На сьогоднішній день акумулятори, що виробляють електроенергію за рахунок хімічної реакції заліза і цинку, доступні в різних конфігураціях. Вони використовуються в якості резервного джерела в домашніх системах, для мереж накопичення і перерозподілу електроенергії, а також для створення автономних енергомереж, наприклад, для розробки віддалених родовищ в гірській промисловості. Про перспективність технології може говорити той факт, що недавно компанія виграла тендер на створення системи стабілізації напруги в Онтаріо (Канада) потужністю 2 МВт / 6МВт.

При цьому фахівці відзначають, що нова технологія Zinc-iron flow battery все ще потребує підтвердження своєї комерційної привабливості. При значному скороченні витрат на її виробництво, батареї цього типу можуть претендувати на значну частку ринку акумуляторів тривалого (3+ години) дії. Крім того, залізно-цинкові

акумулятори, які мають некислу середу, мають кращі показники життєвого циклу системи та продуктивність, ніж інші існуючі нині акумулятори з рідким електролітом. Саме тому стратегічне завдання ViZN – розсудливо розпорядитися залученими інвестиціями, зосередившись на скороченні витрат за рахунок вдосконалення технології виробництва і нарощування обсягів випуску.

Технологія RESolve

Багатопрофільна проектна компанія RES стала одним з ініціаторів будівництва великомасштабного сховища потужністю 88 МВт, ще одне – набагато потужніший, на 200 МВт, знаходиться на стадії проектування.

В основу проектів компанії покладена власна система RESolvecontrol, яка дозволяє інтегрувати в єдину систему пристрої зберігання електроенергії з джерелами генерації (сонячними батареями, вітрогенераторами і т.д.). Система RESolve автоматично визначає оптимальний режим роботи, який дозволяє мінімізувати ризики, правильно перерозподілити отриману енергію для отримання максимального прибутку від оптового продажу енергії в загальну енергосистему. На сьогоднішній день компанія реалізувала близько 10 власних проектів. Крім того, програмна платформа Resolve використовується в декількох сторонніх проектах.

Технологія YCube

Німецько-американська компанія Younicos є одним з провідних постачальників програмного забезпечення для систем зберігання енергії і системних інтеграторів. Компанія, яка виросла з дослідницької лабораторії, має дуже сильні позиції в сонячній і вітряній енергопромисловості Німеччини. Компанія розробила безліч програмних рішень і утиліт для багатьох масштабних проектів в Німеччині. Останнім часом компанія зайнялася просуванням на ринок власного обладнання для накопичення енергії під маркою Y.Cube.

Особливість Y.Cube – це модульна система, яка може підключатися до різних джерел генерації електрики. Модульна конструкція дозволяє створювати системи потужністю від 200 кВт до 10 МВт (для тривалого зберігання електроенергії), і більш потужні системи – до 20 МВт (для зберігання електрики на більш стислі терміни). При цьому програмне забезпечення дозволяє легко налаштувати систему управління системою.

Технологія Advancion

Технологія Advancion – результат більш ніж 30 років роботи компанії на ринку електроенергетики, з яких останні 8 років копанья

активно працює в сегменті комерційного накопичення енергії і програмного забезпечення управління системами зберігання електроенергії. Для комунальних та промислових об'єктів компанія пропонує стандартні конфігурації систем зберігання енергії потужністю від 100 кВт до 1000 МВт. На сьогоднішній день компанія реалізувала кілька масштабних проєктів в Великобританії, Чилі та Нідерландах, до кінця 2016 року приєднається ще кілька об'єктів в Індії, Домініканській Республіці і Філіппінах.

Програмне забезпечення AES дозволяє сполучати різні джерела генерування електроенергії, що особливо важливо в моменти пікових навантажень. Одна з переваг рішень, що пропонує AES – модульний принцип побудови, який дозволяє нарощувати потужність у міру зростаючих потреб користувача. У наприкінці 2015 року компанія випустила 4 версію Advancion. Технологія Advancion легко інтегрується з уже існуючим програмними продуктами диспетчеризації енергозабезпечення. Співпраця AES з провідними виробниками промислових акумуляторів дозволяє істотно знизити витрати і час розгортання при створенні потужних систем зберігання енергії.

Технологія Hybrid Electric Buildings

Програмне забезпечення AMS дозволяє оптимізувати управління наявними ресурсами. Використовуючи передові технології управління навантаженням, за рахунок інтеграції різних джерел електроенергії і диспетчеризації потужності, AMS гарантує своїм замовникам безперебійне забезпечення енергією навіть при самих пікових навантаженнях. Компанія вже реалізувала один великомасштабний проєкт в Каліфорнії – систему зберігання на 3,5 МВт для заводу по обробці та очищення води, зараз компанія зайнята реалізацією ще більшого об'єкту – на 50 МВт. Для побудови системи зберігання AMS використовує Tesla Powerpacks.

Технологія AC battery

Австралійська компанія Enphase часто розглядається як конкурент Tesla насамперед за рахунок просування принципово іншого принципу зберігання енергії – батарей змінного струму – AC battery. Наприкінці 2015 року компанія представила на ринку власну модульну батарею для домашніх енергонакопительних систем потужністю 1,2 кВт / ч за ціною близько 838 доларів за 1 кВт / год. Батарея адаптована до вже існуючих сонячних електростанцій і може бути встановлена у замовника протягом 1,5 годин. Компанія дає гарантію 10 років на літій-залізо-фосфатні акумулятори. В даний час компанія приймає замовлення на установку систем в Австралії і Новій Зеландії, але до

кінця цього року планує вийти на ринок США, а в 2017 – запуститися в Європі.

Технологія V2G and 2nd EV life batteries

Партнерство японської автомобільної компанії Nissan з інженерним гігантом Eaton, що вже мають великий досвід у створенні популярних електромобілів Nissan LEAF, направлено на створення промислових систем накопичення і зберігання енергії. Поки компанії реалізують xStorage – пілотний проект у Великобританії зі створення резервної системи електроживлення для житлового комплексу.

Наведений в вище матеріал дозволяє зробити кілька важливих висновків:

– По-перше, системи зберігання енергії вже мають економічний потенціал при виконанні деяких умов. Про це часто забувають, не враховуючи державні дотації для проектів зі зберігання енергії і економічні втрати від перебоїв в подачі електроенергії.

– По-друге, при проектуванні системи зберігання енергії необхідно вирішити яка технологія (літій-іонна, свинцево-кислотна, лужна або інша) більше підійде для досягнення ваших цілей. Стратегія з використанням декількох технологій буде коштувати дорожче, але і дозволить вашій системі бути більш гнучкою.

– Нарешті, найбільш важливий висновок полягає в наступному: розвиток ринку систем зберігання енергії може перевернути існуючу модель енергетичного забезпечення світу. Сьогодні нетрадиційна енергетика використовується в основному для задоволення миттєвої потреби в енергії. Системи ж зберігання енергії допомагають згладжувати різницю між періодами генерації енергії і навантаження на мережу. Згодом, відновлювані джерела енергії будуть все більше і більше замінювати звичні вугілля і газ.

Через мінливість виробництва електроенергії вітрогенераторами або сонячними панелями системи зберігання енергії стали важливим атрибутом систем енергозабезпечення. Накопичена за день електроенергія подається в мережу ввечері або в пікові моменти споживання, коли енергії, що генерується сонячною електростанцією виявляється недостатньо для потреб споживача. При цьому слід розуміти, що система накопичення і зберігання енергії – це не просто акумулятор, провідні світові компанії вкладають в це поняття дещо інший сенс. Вони пропонують споживачеві комплексне рішення, яке включає в себе як власне акумулятори (накопичувачі), так і програмні рішення, які забезпечують контроль за станом накопичувачів і оптимальним розподілом навантаження.

Контрольні питання до розділу 7

1. Назвіть основні технології отримання водню.
2. Яким чином водень може бути використаний у транспортній галузі?
3. Назвіть основні напрямки розвитку водневої енергетики.
4. В чому особливість використання водню як альтернативного палива у транспортній сфері?
5. Які пристрої інтегрують водневу енергетику в транспортні засоби?
6. Яку роль відіграє воднева енергетика, як проміжний елемент між генерацією та електроприймачем?
7. Які перспективи розвитку «зеленої» транспортної галузі розкриває в майбутньому воднева енергетика?
8. Чи актуальні розробки та технології водневої енергетики в Україні та світі?
9. В чому мінуси водневої енергетики?
10. Який вплив має воднева енергетика на довкілля?
11. В чому складність впровадження та які перепони у широкому форматі впровадження водневої енергетики в транспортну сферу на світовому рівні?
12. Які види транспорту вже мають пілотні проекти щодо впровадження водневої енергетики?

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ
ДЛЯ КОРИСТУВАННЯ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Підручник. К.: НТУУ КПІ, 2012.
2. Звіт Global Bioenergy Statistics 2021, World Bioenergy Association – worldbioenergy.org
3. Міжнародне Енергетичне Агентство - iea.org
4. <https://dieret.rea.org.ua/uk/biomass-energy.html>
5. Bertani R. Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report. World Geothermal Congress 2015. (19-25 April 2015, Melbourne, Australia).
<https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/01001.pdf>.
6. World Geothermal Congress 2015. Media Portal.
<http://www.geothermalpress.com/>.
7. Geothermal Handbook: Planning and Financing Power Generation. The World Bank. Technical Report 002/12, 72828. Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP).
<http://documents.worldbank.org/curated/en/396091468330258187/pdf/728280NWP0Box30k0TR0020120Optimized.pdf>.
8. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/109877/10-Dolinskiy.pdf?sequence>
9. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. Схвалена Розпорядженням КМУ №1071 від 24.07.2013.
<http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13/para3#n3>
10. Закон України «Про ринок електричної енергії»
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>
11. EU Energy in Figures. Statistical Pocketbook 2014.
12. Матеріали Міжнародної Асоціації централізованого енергопостачання (International District Energy Association)
<http://www.districtenergy.org/blog/2015/07/14/13939/energiewende-2050-targets-schope-2015-chart/>
13. Renewables 2015. Global Status Report <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>
14. IRENA (2014), REmap 2030: A Renewable Energy Roadmap, June 2014.
http://www.irena.org/remap/IRENA_REmap_Report_June_2014.pdf
15. RE-Thinking 2050. A 100% Renewable Energy Vision for the European Union. EREC, 2010.

- http://www2.warwick.ac.uk/fac/soc/csgr/green/foresight/energyenvironment/2010_erec_rethinkng_2050.pdf
16. World Energy Scenarios. Composing energy futures to 2050. Prepared by World Energy Council, 2013.
<https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/World-Energy-Scenarios-Composing-energy-futures-to-2050-Full-report.pdf>
 17. Енергетичний баланс України за 2019 рік. Експрес-випуск Державної служби статистики України від 28.11.2019 № 510/0/08.4ВН-14.
 18. Постанова КМУ № 902-р від 01.10.2104 «Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року»
<http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80>
 19. Energy Strategy 2050 - from coal, oil and gas to green energy (Denmark), 2011.
<http://www.efkm.dk/sites/kebmin.dk/files/news/from-coal-oil-and-gas-to-green-energy/Energ%20Strateg%202050%20web.pdf>
 20. Кузьмінський Є.В., Колбасов Г.Я., Тевтуль Я.Ю., Голуб Н.Б. Нетрадиційні електрохімічні системи перетворення енергії. Фото-, термо- та біопаливні елементи. – Чернівці: Рута. – 2003. – 95 с.
 21. Кузьмінський Є.В., Гвоздяк П.І., Голуб Н.Б. Біопаливні елементи – проблеми і перспективи розвитку. 1. Ферментні паливні елементи // Мікробіологія і біотехнологія. – 2008. – №3. – С. 21–30.
 22. Кузьмінський Є.В., Гвоздяк П.І., Голуб Н.Б. Біопаливні елементи – проблеми і перспективи розвитку. 2. Мікробні паливні елементи // Мікробіологія і біотехнологія. – 2009. – №3. – С. 15–30.
 23. Кузьмінський Є.В., Щурська К.О. Біоелектрохімічне генерування водню в мікробному паливному елементі. 1. Загальна частина // Відновлювана енергетика. – 2010. – №4(23). – С. 87–97.
 24. Кузьмінський Є.В., Голуб Н.Б., Лесько І.О. Електрохімічні аспекти біоенергетики // Відновлювана енергетика. – 2006. – №3. – С. 87–93.
 25. Заявка на корисну модель №201006778 "Спосіб отримання електричної енергії за допомогою мікробного паливного елемента" Голуб Н.Б., Кузьмінський Є.В., Андруховець В.М., дата подання 01.06.2010, позитивне рішення від 01.11.2010.
 26. O'Hayre R., Cha S-W., Colella W., Prinz V. F. Fuel Cell Fundamentals. – John Wiley & Sons, Hoboken, NJ. – 2009. – 576 p.
 27. Васильєв О.Д., Баклан В.Ю., Макордей Ф.В. Керамічні паливні комірки: український досвід // Вісник Одеського національного університету. – 2010. – Химия. – Т. 15, вып. 3. – С. 98-106.
 28. Перфильев М.В., Демин А.К., Кузин Б.Л., Липилин А.С. Высокотемпературный электролиз газов. – М.: Наука. – 1988. –

232 с.

29. Мельник Л.Г., Карінцева О.І., Сотник І.М. Економіка енергетики: Навч. посібник. - Суми: ВТД „Університетська книга”, 2006. – 238 с.
30. Renewables 2015. Global Status Report <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>
31. IRENA (2014), REmap 2030: A Renewable Energy Roadmap, June 2014. http://www.irena.org/remap/IRENA_REmap_Report_June_2014.pdf
32. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. COM(2011) 112 final, 8.3.2011 <http://eurlex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5db26ecc-ba4e-4de2-ae08-dba649109d18.0002.03/D0C1&format=PDF>
39. Денисюк С. П. Технологічні орієнтири реалізації концепції smart grid в електроенергетичних системах/П. Денисюк.//Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – С. 7-20.
40. Technology Roadmap Smart Grids. – Paris: OECD/IEA, 2011. – 52 p.
41. Олійник Ю.С. Управління енергозбереженням та енергоспоживанням на промислових господарських підприємствах/Ю.С. Олійник// Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: зб. наук. праць – Харків, 2016. - №176 – С. 87-88.
42. Smart Grids and Energy Storage Bottled Sunlight [Електронний ресурс] // Pictures of the Future. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/energy-and-efficiency/smart-grids-and-energy-storage-bottled-sunlight.html>.
43. World’s Largest Fuel Cell Plant Opens in South Korea [Електронний ресурс] // Power. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.powermag.com/worlds-largest-fuel-cell-plant-opens-in-south-korea/>.
44. SDG&E and Sumitomo unveil largest vanadium redox flow battery in the US [Електронний ресурс] // Energy Storage. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.energy-storage.news/news/sdge-and-sumitomo-unveil-largest-vanadium-redox-flow-battery-in-the-us>.
45. A Hybrid Approach to Energy Storage [Електронний ресурс] // Electronic Design. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.electronicdesign.com/power/hybrid-approach-energy-storage>.
46. Creating renewable energy storage out of hot air [Електронний ресурс] // New atlas. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://newatlas.com/ricas-2020-aa-compressed-air-energy->

- storage/48661/.
47. Hybrid energy storage systems for renewable energy applications. // ELSEVIER. – 2015. – №73. – С. 103-111.
 48. A novel use of the hybrid energy storage system for primary frequency control in a microgrid / [L. Jianwei, Y. Qingqing, Y. Pengfei та ін.]. // ELSEVIER. – 2016. – №103. – С. 82-87.
 49. Wenlong J. Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: areview / J. Wenlong, H. Chean, H. Shung. // IEEE. – 2017. – №11. – С. 461-469.
 50. Design and new control of DC/DC converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles / M. Camara, H. Gualous, F. Gustin, A. Berthon. // IEEE. – 2008. – №57. – С. 2721-2735.
 51. Jiang Z. A compact digitally controlled fuel cell/battery hybrid power source / Z. Jiang, R. Dougal. // IEEE. – 2006. – №53. – С. 1094-1104.
 52. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems / [L. Chong, Y. Wong, R. Rajkumar та ін.]. // ELSEVIER. – 2016. – №66. – С. 174-189.
 53. Modelling and Simulation of Standalone PV Systems with Battery-supercapacitor Hybrid Energy Storage System for a Rural Household / W. C. Lee, W. W. Yee, K. R. Rajprasad, I. Dino. // ELSEVIER. – 2016. – №107. – С. 232-236.
 54. Нерубацький В. П., Палхтій О. А., Машура А. В., Гордієнко Д. А. Аналіз технічних характеристик акумуляторних батарей і систем заряджання електромобілів Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті ІКСЗТ, 2019 №6 с. 11-19.
 55. В. А. Малярєнко, Л. В. Лисак Енергетика, довкілля, енергозбереження. / Під заг. ред. проф. В. А. Малярєнка, Х.: Рубікон, 2004. – 368 с.
 56. The Future of Hydrogen Seizing today's opportunities, IEA, 2019.
 57. Solar Panel Splits Water to Produce Hydrogen, <https://spectrum.ieee.org>, Mar'19.
 58. Japan team evaluates battery-assisted low-cost hydrogen production from solar energy, <https://www.greencarcongress.com>, Feb'19.
 59. <https://avenston.com/articles/hydrogen-future/>
 60. <https://e-auto.in.ua>
 61. <https://sp-rent.com.ua/news/358-xcmg-vypuskaet-bespilotnyy-elektricheskiy-karernyy-samosval.html>
 62. <https://avenston.com/solutions/bess/>
 63. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.106>
 64. <https://www.railway.supply/uk/akumulyatorna-tyaga-na-zalizniczi/>

65. <https://energyukraine.org/wp-content/uploads/2018/05/Otchet-MGES2.pdf>
66. <https://uhe.gov.ua/diyalnist/gidroenergetika>
67. <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-1/section-2/2-4>



Касаткіна Ірина Віталіївна 1951 р. народження.

У 1973 р. закінчила Криворізький орден Трудового Червоного Прапора гірничорудний інститут, кандидат технічних наук (1992 р.), доцент (1993 р.).

З 2011 – доцент кафедри Автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті ДВНЗ «Криворізький національний університет». Автор майже 100 науково-методичних праць.



Бойко Сергій Миколайович 1987 р. народження.

У 2011 р. закінчив Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, кандидат технічних наук (2014 р.).

З 2022 р. доцент кафедри Транспортні технології Національного університету «Запорізька політехніка»,

Автор більше 200 науково-методичних праць, у т.ч. 22 патентів та 5 авторських свідоцтв, 11 навчальних посібників та 12 монографій.



Вишневський Святослав Янович 1976 р. народження.

У 1998 р. закінчив Вінницький державний технічний університет, кандидат технічних наук (2014 р.), доцент кафедри Електричних станцій та систем (2023 р.).

З 2015 р. старший викладач кафедри ЕСС Вінницького національного технічного університету.

Автор близько 50 наукових праць, в т.ч. міжнародних науко-метричних баз, навчальних посібників, монографій.

Навчальний посібник

Касаткіна Ірина Віталіївна
Бойко Сергій Миколайович
Вишневський Святослав Янович

**ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ, НАКОПИЧЕННЯ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА
АЛЬТЕРНАТИВНІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ ДЛЯ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Subscribe to print 04/09/2023. Format 60×90/16.
Edition of 300 copies.
Printed by “iScience” Sp. z o. o.
Warsaw, Poland
08-444, str. Grzybowska, 87
info@sciencecentrum.pl, <https://sciencecentrum.pl>



ISBN 978-83-66216-82-2



9 788366 216822