

І.О. Сінчук, С.М. Бойко

СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

підручник

**Під редакцією
доктора техн. наук,
професора Сінчука О.М.**

**м. Кременчук
2020 р.**

УДК 620.918
ББК 31.261я73
Т 38

Рекомендовано до друку Вченою радою Криворізького національного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 9 від 30.06.2020)

Рецензенти:

Далека В.Х., доктор технічних наук, професор (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків)

Денисюк С.П., доктор технічних наук, професор (Національний Технічний Університет України "Київський Політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ)

Сиченко В.Г., доктор технічних наук, професор (Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро)

І.О. Сінчук, С.М. Бойко

Т 38 Системи накопичення електричної енергії. Підручник / І.О. Сінчук, С.М. Бойко; під ред. доктора технічних наук, професора О.М. Сінчука. – Кривий Ріг, 2020. – 219 с.

ISBN ...

У підручнику викладено основні положення про системи накопичення електричної енергії, основні принципи їх використання та обслуговування. Розглянуті конструкції та режими роботи систем накопичення електричної енергії, що використовуються в системах альтернативні джерела енергії та у промисловості. Наведені приклади та світового досвід експлуатації систем накопичення електричної енергії.

Рекомендовано для фахівців, аспірантів та студентів за напрямком 141 – «Енергетика, електротехніка та електромеханіка» та інших споріднених спеціальностей при вивченні дисциплін «Системи накопичення електричної енергії» та «Автономні джерела енергії».

УДК 620.918

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	5
Вступ	6
Розділ 1 Загальні відомості	8
1.1 Поняття та класифікація систем накопичення електричної енергії.....	8
1.2 Історичні передумови використання акумуляторних батарей.....	30
1.3 Світові тенденції розвитку та застосування систем накопичення електричної енергії.....	38
Контрольні питання до розділу 1.....	56
Розділ 2 Свинцево-кислотні акумуляторні батареї	57
2.1 Особливості конструкції свинцево-кислотних акумуляторних батарей....	57
2.2 Заряд свинцево-кислотних акумуляторних батарей.....	67
2.3 Особливості експлуатації свинцево-кислотних акумуляторних батарей...	72
Контрольні питання до розділу 2.....	77
Розділ 3 Нікель-кадмієві акумуляторні батареї	78
3.1 Конструкція нікель-кадмієвих акумуляторних батарей.....	78
3.2 Особливості заряду нікель-кадмієвих акумуляторних батарей.....	79
3.3 Експлуатаційні характеристики нікель-кадмієвих акумуляторних батарей.....	82
Контрольні питання до розділу 3.....	84
Розділ 4 Літій-іонні акумуляторні батареї	85
4.1 Особливості побудови літій-іонних акумуляторних батарей.....	85
4.2 Заряд літій-іонних акумуляторних батарей.....	96
4.3 Пристрої захисту захисту літій-іонних акумуляторних батарей під час експлуатації.....	101
Контрольні питання до розділу 4.....	103
Розділ 5 Методи заряду акумуляторних батарей	104
5.1 Залежність струму заряду від ємності акумуляторних батарей.....	108

5.2 Глибина заряду.....	112
5.3 Особливості заряду при низьких та високих температурах.....	113
5.4 Принципи розрахунку акумуляторних батарей.....	118
Контрольні питання до розділу 5.....	119
Розділ 6 Пристрої для заряду акумуляторних батарей.....	120
6.1 Принципи побудови зарядних пристроїв.....	120
6.2 Зарядні пристрої свинцево-кислотних акумуляторних батарей.....	125
6.3 Зарядні пристрої нікель-кадмієві акумуляторних батарей.....	127
6.4 Зарядні пристрої літій-іонних акумуляторних батарей.....	133
Контрольні питання до розділу 6.....	139
Розділ 7 Моніторинг параметрів тягових акумуляторних батарей шахтних контактних акумуляторних електровозів.....	140
7.1 Особливості акумуляторних батарей як елементів систем тягових електротехнічних комплексів шахтних електровозів.....	140
7.2 Характеристики тягових акумуляторних батарей.....	144
7.3 Аналіз можливих варіантів схемотехнічних рішень підсистем моніторингу стану тягових акумуляторних батарей шахтних контактних акумуляторних електровозів.....	159
7.4 Спосіб визначення неполадок у тягових акумуляторних батареях шахтних електровозів.....	172
Контрольні питання до розділу 7.....	175
Розділ 8 Сучасні розробки систем накопичення електричної енергії.....	176
8.1 Огляд сучасних тенденцій розвитку систем накопичення електричної енергії	176
8.2 Загальні характеристика Smart batteries.....	180
8.3 Місце систем накопичення електричної енергії в системах Smart Grid...	188
8.4 Огляд сучасних розробок систем накопичення електричної енергії.....	191
Контрольні питання до розділу 8.....	205
Список використаної та рекомендованої для користування літератури	206

Перелік умовних скорочень

- АБ – акумуляторна батарея;
- АЕС – атомна електростанція;
- ВДЕ – відновлювані джерела енергії;
- ВЕС – вітроенергетична система;
- ВЕУ – вітроенергетична установка;
- ГАЕС – гідроакумулююча електростанція;
- ГЕС – гідроелектростанція;
- ЄС – Європейський Союз;
- ККД – коефіцієнт корисної дії;
- СНЕ – системи накопичення енергії;
- СК – система керування;
- ТЕС – теплова електростанція;
- ФЕУ – фотоелектрична установка.

Вступ

Останнім часом, все частіше під час різноманітних зустрічей, присвячених енергетиці, підіймається питання потреби розвитку в Україні найближчим часом систем накопичення енергії (СНЕ) або англійською “energy storage facilities”.

У електричній системі, накопичення енергії означає відкладення споживання електричної енергії до іншого моменту, ніж момент її виробництва, або перетворення електричної енергії у форму енергії (фізичні, інерційні, хімічні, водневі та інші технології), яка може зберігатися, зберігання такої енергії та подальше перетворення такої енергії у електричну електроенергію або використання як іншого носія енергії (відповідно до Директиви (ЄС) Європейського Парламенту та Ради 2019/944 від 5 червня 2019 року про загальні правила для внутрішнього ринку електроенергії, яка вносить зміни до Директиви). СНЕ, по суті, є устаткування, на якому здійснюється накопичення енергії [1].

Наразі, існують різноманітні технології СНЕ, зокрема [2]:

1) твердотільні акумулятори – ряд електрохімічних накопичувачів, у тому числі сучасні хімічні акумулятори та конденсатори;

2) проточні акумулятори – акумулятори, в яких енергія накопичується безпосередньо в розчині електроліту для збільшення терміну служби і миттєвого спрацювання;

3) маховики – механічні пристрої, що використовують енергію обертання для миттєвої подачі електричного струму;

4) система зберігання енергії на основі стисненого повітря

5) сховище теплової енергії – акумулювання тепла і холоду для створення енергії на вимогу та її виділення в зручний для споживачів час;

6) насосна гідроакумулювальна електростанція – створення та зберігання енергії з використанням двох резервуарів із водою, розташованих на різних висотах;

7) гравітаційні накопичувачі енергії – пристрої, які генерують електрику, випускаючи у разі потреби важкий вантаж із певної висоти;

8) системи зберігання енергії на основі перетворення енергії на газ (водень, біометан, синтез-газ тощо).

З поміж інших, після насосних гідроакumuлюючих електростанцій, найбільш популярною технологією в електричних системах є літій-іонні батареї, які відповідно до інформації на сайті Інституту Вивчення Навколишнього Середовища та Енергії (Environmental and Energy Study Institute) і станом на початок 2020 року займали частку близько 90% на ринку СНЕ для електромереж. Зазначена технологія використовується для регулювання енергетичних систем та зменшення впливу від піків електроенергії, вироблених сонячними та вітровими електростанціями.

На разі, промислові СНЕ на базі літій-іонних батарей чи аналогічних технологій в Україні відсутні. Між тим, інвестори мають можливість збудувати СНЕ і здійснювати господарську діяльність на ринку електричної енергії з їх допомогою, зокрема, закуповувати та продавати електроенергії на ринку на добу вперед, внутрішньодобовому ринку, брати участь у ринку балансуєчих послуг та допоміжних послуг. Крім цього, виробники електроенергії з відновлювальних джерел енергії можуть використовувати СНЕ задля зберігання електроенергії під час пікового виробництва, зокрема сонячними електростанціями, коли мережа не може прийняти відповідний обсяг енергії [3-10].

Відповідно до BloombergNEF, вартість СНЕ (у формі літійіонних батарей) впала з 1,100 доларів з кВт·год у 2010 році, на 87% до \$156 кВт·год в 2019 році. Хоча, для дійсно великих проектів вартість відповідно до оцінок фахівців залишається понад \$ 300 за кВт·год потужностей, зокрема відповідно до аналізу Lazard. Тому, такі проекти досі є дуже капіталомісткими. Оптимально використовувати батарейні СНЕ для надання допоміжних послуг для підтримання частоти. Відповідно до коментарів деяких потенційних інвесторів, строк окупності таких проектів може перевищувати 10 років і більше [11].

Розділ 1 Загальні відомості

1.1 Поняття та класифікація систем накопичення електричної енергії

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: $1 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 3600 \text{ Дж}$.

При низьких температурах ефективність акумуляторів всіх електрохімічних систем різко знижується. Разом з тим, NiCd акумулятори можуть працювати й при -40°C , у той час як температура -20°C є межею, при якому NiMH, SLA й Li-ion акумулятори припиняють функціонувати.

Хоча акумулятор і може працювати при холодних температурах, але це зовсім не означає, що він автоматично може також бути заряджений при тих умовах. Сприйнятливість до заряду більшості акумуляторів при дуже низьких температурах надзвичайно обмежена і струм заряду за таких умов повинен бути зменшений до $0,1^{\circ}\text{C}$.

Акумулятори широко застосовують в техніці: на автомобільному, морському, повітряному і залізничному транспорті, в радіотехніці, на телефонних і електричних станціях, електромобілях, для освітлення і сигналізації на штучних супутниках Землі, космічних апаратах тощо.

У 2016 році міжнародна енергетична компанія AES ввела в експлуатацію сховище електроенергії з батареєю літій-іонних акумуляторів ємністю 20 МВт•год, під'єднане до єдиної енергосистеми Нідерландів, призначене для зберігання надлишку електроенергії від віднолюваних джерел енергії.

Акумулятор, як і будь-яке хімічне джерело струму, складається з позитивного і негативного електродів та електроліту, в який вони занурені. Різниця потенціалів, що виникають на межі стикання електродів з електролітом, утворює ЕРС акумулятора (або напругу акумулятора при розімкненому колі). Під час розряду акумулятора енергія хімічних реакцій перетворюється на електричну енергію; при зарядці, навпаки, електрична енергія перетворюється на хімічну.

Стартерна акумуляторна батарея виконана у формі системи із декількох електрохімічних комірок. Послідовно з'єднані електрохімічні комірки називають «батареєю» [38].

Акумуляторна батарея може бути виконана із декількох електрохімічних комірок, об'єднаних в один електричний ланцюг. Ці комірки сполучені електрично і конструктивно для отримання необхідних значень струму і напруги. Використовується, зокрема, як джерело енергії для живлення

тягових електродвигунів акумуляторних електровозів. Основні параметри, які характеризують такий акумулятор, – електрорушійна сила, напруга, внутрішній опір, струм та ємність.

В акумуляторах глибокого заряду-розряду (поїздів, човнів, автотранспорту), автомобільних акумуляторах (забезпечують постійну подачу струму протягом тривалого періоду часу) енергію виробляють елементи – група свинцевих пластин покритих окисом свинцю і кислотою. Свинцеві решітки покриті окисом свинцю і кислотою називають пластинами. Поперемінно чергуючи позитивні і негативні пластини складені стопками і вставлені у футляри називають елементами.

Лужні залізонікелеві акумулятори (що застосовуються частіше) у порівнянні з кислотними свинцевими мають ряд переваг: можуть зберігатися в розрядженому або напіврозрядженому стані, не виходять з ладу в результаті коротких замикань, мають більший строк служби. Переваги кислотних А.б.: вищий ККД, вища розрядна напруга, менший внутрішній опір. На шахтах в А.б. використовують кислотні (свинцеві) і лужні (залізонікелеві) акумулятори.

Акумуляторний завод в Тюмені освоїв технологію промислового випуску акумуляторів ЗСТ-55А в 1986 році.

Нині одним з найбільших в Європі виробників стартерних акумуляторних батарей є Національна акумуляторна корпорація "ISTA".

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 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 1.1 – Характеристики акумуляторів

Тип	Напруга	Щільність енергії			Потужність	ККД	E/\$	Розряд.	Кількість циклів	Тривалість використання
	(В)	(МДж/кг)	(Вт·г/кг)	(Вт·г/л)	(Вт/кг)	(%)	(Вт·г/\$)	(%/міс.)		(років)
Лужнокислотний	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+
Суперзалізо										
Сріблоцинк			130	240						
Na-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; кріогенні системи зберігання, акумулювання енергії зрідженим повітрям (LAES); кріогенний 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)).

Механічне накопичення

Гідроелектрика

Гідроелектростанції з водосховищами можуть експлуатуватися для забезпечення електроенергією в періоди пікового попиту. Вода зберігається в резервуарі в періоди низької потреби і вивільняється за високої потреби. Ефект аналогічний накопиченню з перекачуванням, але без супутніх витрат. Хоча гідроелектростанція безпосередньо не накопичує енергію з інших джерел, вона поводить еквівалентно, знижуючи вироблення в період надлишку електроенергії, отриманої з інших джерел. В цьому режимі греблі є однією з найбільш ефективних форм акумулювання енергії, оскільки змінюються тільки терміни її генерування. Гідроелектричні турбіни мають час запуску порядку декількох хвилин [12-40].

Гідроакумулювальна електростанція

У всьому світі гідроакумулювальна електростанція (ГАЕС) є найбільшою формою накопичення енергії у великих масштабах. Енергетична ефективність ГАЕС варіюється, на практиці, від 70 % до 80 %.

У періоди низької потреби в електроенергії, надлишкова генерувальна потужність використовується для перекачування води з нижнього резервуара у верхній. Коли попит зростає, вода надходить назад в нижній резервуар (або водний шлях/водойму) через турбіну, що виробляє електрику. Реверсивні

турбогенераторні вузли діють як насос і турбіна (зазвичай це турбіна Френсіса). Майже всі подібні споруди використовують перепад висот між двома водоймами. Насосно-накопичувальні установки «в чистому вигляді» переміщують воду між резервуарами, в той час як підхід з «відкачуванням» являє собою комбінацію насосних сховищ і звичайних гідроелектростанцій, що використовують природний плин води [12-40].

Технологія накопичення енергії стисненого повітря

Пневматичний акумулятор використовує надлишкову енергію для стиснення повітря з метою подальшого виробництва електроенергії. Стиснене повітря зберігається в підземному резервуарі.

Пневматичний акумулятор може подолати розрив між волатильністю виробництва і навантаженням. Пневматичний акумулятор задовольняє потреби споживачів в енергії, ефективно забезпечуючи доступну енергію для задоволення попиту. Поновлювані джерела енергії, такі як енергія вітру і сонця, мають змінні ресурси. Як наслідок, для задоволення попиту на енергію в періоди зниження доступності відновлюваних ресурсів необхідно додавати інші види енергії. Установки для зберігання енергії на стиснутому повітрі здатні акумулювати надлишкову енергію від відновлюваних джерел енергії під час перевиробництва енергії. Ця накопичена енергія може бути використана, коли зростає попит на електроенергію або зменшується доступність енергетичних ресурсів.

Стиснення повітря створює тепло: при стисканні повітря теплішає. Розширення, зі свого боку вимагає теплової енергії. Якщо не додавати енергії, повітря після розширення буде набагато холоднішим. Якщо тепло, що виділяється під час стиснення, може акумулюватися і використовуватися під час розширення, ефективність значно підвищується [12-40].

Технологія накопичення енергії маховиком

Накопичувач енергії маховика (FES) працює за рахунок прискорення ротора (маховика) до дуже високої швидкості, акумулюючи енергію обертання¹. Коли енергія споживається, швидкість обертання маховика зменшується; додавання енергії відповідно призводить до збільшення швидкості маховика.

Акумуляція тепла здійснюється шляхом нагрівання матеріалу для накопичення енергії.

Більшість систем FES використовують електрику для прискорення й уповільнення маховика, але розглядаються і пристрої, які безпосередньо використовують механічну енергію.

Системи FES мають ротори, виготовлені з високоміцних вуглецево-волокнистих композитів, підвішених на магнітних підшипниках, які обертаються з частотою від 20000 до більше ніж 50000 об/хв у вакуумному корпусі. Такі маховики можуть досягати максимальної швидкості («заряду») за лічені хвилини. Система маховика з'єднана з комбінованим електродвигуном/генератором.

Системи FES мають відносно довгий термін служби (десятиліття, практично не вимагаючи технічного обслуговування; термін служби повного циклу, вказаний для маховиків, варіюється від 10^5 до 10^7 циклів використання), високу питому енергію (100–130 Вт·год/кг або 360–500 кДж/кг) і питома потужність .

Накопичення гравітаційної потенціальної енергії твердих мас

Зміна висоти твердих мас може накопичувати або виділяти енергію через підймальну систему, що приводиться в рух електродвигуном/генератором.

Методи включають використання рейок і кранів для переміщення бетонних вантажів угору і вниз, використання висотних плавучих платформ на сонячних батареях, що підтримують лебідки для підймання і опускання твердих мас.

Накопичення теплової енергії

Акумуляція теплової енергії – це тимчасове зберігання або відведення тепла.

Акумуляція теплової енергії

Технології сезонного накопичення теплової енергії – дозволяють використовувати тепло або холод через місяці після того, як воно було отримане з природних джерел або відходів. Акумуляція може відбуватися у водоносних шарах, скупченнях свердловин в геологічних субстратах, таких як пісок або кристалічні породи, в вистелених ямах, заповнених гравієм і водою, або в заповнених водою шахтах. Технології СНТЕ часто мають термін окупності в

діапазоні від чотирьох до шести років. Прикладом є спільнота сонячних батарей Drake Landing в Канаді, для якої 97 % цілорічного тепла забезпечується сонячно-тепловими колекторами на дахах гаражів, а свердловинний накопичувач теплової енергії (СНТЕ) є підтримувальною технологією. У Бредstrupі (Данія) система комунального сонячного теплопостачання, також використовує СНТЕ за температури зберігання 65 °C (149 °F). Тепловий насос, який працює тільки за наявності надлишкової енергії вітру в єдиній енергомережі, використовується для підвищення температури до 80 °C (176 °F) для постачання. Коли надлишкової електрики, що генерується вітром, немає, використовується газовий котел. 20 % відсотків тепла у Бредstrupі мають сонячне походження.

Акумуляторна батарея містить один або кілька електрохімічних елементів. Акумулятори бувають різних форм і розмірів, від кнопок до мегаватних енергосистем [12-40].

Приховане накопичення теплової енергії

Приховані системи накопичення теплової енергії працюють з матеріалами з високою прихованою теплоємністю, відомими як матеріали з фазовим переходом (PCM). Основною перевагою цих матеріалів є те, що їх прихована теплоємність набагато більша, ніж відчутне тепло. У певному температурному діапазоні фазовий перехід від твердого до рідкого поглинає велику кількість теплової енергії для подальшого використання.

Приховане накопичення теплової енергії являє собою процес, за допомогою якого енергія у формі тепла або поглинається, або виділяється під час фазового переходу матеріалу. Під час фазового переходу речовина має здатність поглинати велику кількість енергії через високу теплоту плавлення [12-40].

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 густини 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.

Технологія Power-to-Gas – це технологія, за якої за рахунок електричної енергії отримують газоподібне паливо, наприклад, водень або метан. Відомі три методи використання електрики для перетворення води на водень і кисень за допомогою електролізу.

Мають низький струм живлення для резервного копіювання пам'яті в статичній оперативній пам'яті. Може бути застосовано для живлення для автомобілів, автобусів, поїздів, кранів і ліфтів, зокрема рекуперация енергії при гальмуванні, короткочасне накопичення енергії і подача живлення в імпульсному режимі [20-50].

Інші хімічні речовини

Технологія Power-to-Gas (P2G)

При першому методі водень впорскується в мережу природного газу. Другий метод полягає в реакції водню з діоксидом вуглецю для отримання метану, з використанням реакції метанування (такий, як реакція Сабатьє) або біологічного метанування, що призводить до додаткової втрати перетворення енергії на 8 %. Потім метан можна подавати в газову мережу. Третій метод використовує вихідний газ з генератора деревного газу або біогазової установки після того, як модифікатор біогазу змішаний з воднем з електролізера, щоб поліпшити якість біогазу.

Водень

Водень теж можна розглядати як накопичувач енергії: електрика в цьому випадку отримується за допомогою водневого паливного елемента.

Підземне зберігання водню здійснюється в підземних печерах, соляних куполах і виснажених нафтових і газових родовищах. Imperial Chemical Industries протягом багатьох років зберігає в підземних печерах великі кількості газоподібного водню без жодних проблем. Європейський проект Hyunder вказав у 2013 році, що для акумуляції енергії вітру і сонця з використанням підземного водню потребує 85 печер.

Для синтезу кілограма водню потрібно близько 50 кВт·год (180 МДж) сонячної енергії, тому вартість електроенергії є критично важливою.

Метан

Метан – найпростіший вуглеводень з молекулярної формулою CH_4 . Метан легше зберігати і транспортувати, ніж водень. Є повноцінна інфраструктура його зберігання і спалювання (трубопроводи, газометри, електростанції).

Синтетичний природний газ (синтез-газ або SNG) може бути створений у багатоступінчастому процесі, починаючи з водню і кисню. Водень реагує з діоксидом вуглецю в реакції Сабатьє, виробляючи метан і воду. Метан може зберігатися, а потім використовуватися для виробництва електроенергії. Отримана вода рециркулює, зменшуючи потребу в зовнішніх її джерелах. На

стадії електролізу, кисень зберігається для спалювання метану в чистому кисневому середовищі на сусідній електростанції.

Під час згоряння метану утворюються вуглекислий газ (CO_2) і вода. Вуглекислий газ може бути повторно використаний для процесу Сабатьє, а вода може бути використана для подальшого електролізу.

Біопаливо

Викопне паливо можуть замінювати різні види біопалива, такі як біодизельне паливо, рослинна олія, спиртове паливо або біомаса. Хімічні процеси дозволяють перетворювати вуглець і водень (в складі вугілля, природного газу, рослинної і тваринної біомаси та органічних відходів) на прості вуглеводні, придатні для заміни традиційних вуглеводневих видів палива. Прикладами є дизельне паливо Фішера-Тропша, метанол, диметиловий ефір і синтез-газ. Це джерело дизельного палива широко використовувалося під час Другої світової війни в Німеччині, яка зіткнулася з обмеженим доступом до постачань сирової нафти. З тих же причин Південна Африка виробляє більшу частину дизельного палива з вугілля.

Алюміній

Низкою дослідників як енергонакопичувач був запропонований алюміній. Електрохімічний еквівалент алюмінію майже в чотири рази більший, ніж у літію. Енергія може вилучатись з алюмінію шляхом його взаємодії з водою з утворенням водню. Однак для реакції з водою алюміній повинен бути відділений від його природного оксидного шару. Це процес, який вимагає подрібнення, а також хімічних реакцій з їдкими речовинами або сплавами. Побічним продуктом реакції з утворенням водню є оксид алюмінію, який може бути перероблений назад в алюміній у рамках процесу Голла-Герулта, роблячи реакцію теоретично відновлюваною. Якщо процес Голла-Герулта запускається з використанням сонячної або вітрової енергії, алюміній може використовуватися для зберігання енергії, причому у такого процесу ефективність вища, ніж у прямого сонячного електролізу.

Інші хімічні речовини

Органічна сполука норборнадієн у реакції перетворення на квадрициклан під дією світла, зберігає сонячну енергію у формі енергії хімічних зв'язків. Діючий зразок був розроблений у Швеції і позиціюється як молекулярна сонячна теплова система.

Конденсатор

Конденсатор – це пасивний двополюсний електричний компонент, який використовується для електростатичного накопичення енергії. На практиці конденсатори сильно розрізняються, але всі вони містять, щонайменше, два електричних провідники (обкладки), розділені діелектриком (ізолятором). Конденсатор може зберігати електричну енергію, коли він відключений від зарядного кола, тому його можна використовувати як тимчасову батарею або як інші види перезаряджуваних систем накопичення енергії. Конденсатори зазвичай використовуються в електронних пристроях для підтримки живлення під час заміни батарей (це запобігає втраті інформації в енергозалежній пам'яті). В середньому конденсатори мають густину енергії менше 360 Дж/кг, у той час як у звичайної лужної батареї цей параметр становить близько 590 кДж/кг.

Конденсатори накопичують енергію в електростатичному полі між обкладками. Завдяки різниці потенціалів на провідниках (наприклад, коли конденсатор приєднано до батареї), електричне поле проходить через діелектрик, змушуючи додатний заряд (+Q) збиратися на одній обкладці і від'ємний (-Q) – на іншій. Якщо акумулятор підключений до конденсатора протягом достатнього часу, через конденсатор не може протікати струм. Однак якщо на виводи конденсатора подається напруга, може виникати струм зміщення [20-50].

На практиці діелектрик між пластинами пропускає невеликий струм у вигляді витоку і має межу напруженості електричного поля, відому як напруга пробою. Однак ефект відновлення діелектрика після пробою високою напругою може привести до створення нового покоління самовідновлюваних конденсаторів.

Надпровідні індуктивні накопичувачі

Надпровідний індуктивний накопичувач (НПН) зберігає енергію в магнітному полі, створюваному потоком постійного струму в надпровідній котушці, яка була охолоджена до температури нижче її критичної температури надпровідності. Типова система НПН включає надпровідну котушку, систему кондиціонування та холодильник. Як тільки надпровідна котушка заряджена, струм не розпадається, і магнітна енергія може зберігатися нескінченно довго.

Накопичена енергія може бути передана в мережу шляхом розрядження котушки. Відповідний інвертор/випрямляч забезпечує приблизно 2-3 % втрат енергії в кожному напрямку. НПН втрачає найменшу кількість електроенергії у процесі накопичення енергії, порівняно з іншими методами зберігання енергії.

Через енергетичні вимоги охолодження і вартість надпровідного проводу, НПН використовується для короткочасного зберігання, наприклад, для поліпшення якості електроенергії. Ця система зберігання застосовується так само в балансуванні мережі [20-50].

Застосування надпровідних індуктивних накопичувачів

Млини

Класичним застосуванням накопичення енергії до промислової революції було управління водними шляхами для приведення в дію водяних млинів для обробки зерна або привідної техніки. Складні системи водосховищ і гребель були побудовані, щоб зберігати і випускати воду (і потенціальну енергію, яку вона містить), коли потрібно.

Домашнє накопичення енергії

Очікується, що накопичення енергії в домашніх умовах стане все більш поширеним явищем, враховуючи зростання важливості розподіленого виробництва поновлюваних джерел енергії (особливо фотоелектричних) і значну частку споживання енергії в житлових будинках. Щоб підвищити самозабезпеченість (самостійність) на 40 % у будинку, обладнаному фотоелектричними приладами, необхідне накопичення енергії. Деякі виробники

виробляють акумуляторні батареї для зберігання енергії, як правило, для утримання надлишкової енергії розосередженої генерації. Сьогодні для зберігання енергії в домашніх умовах літій-іонні акумулятори кращі від свинцево-кислотних, враховуючи їх аналогічну вартість, але значно вищу продуктивність.

Tesla Motors випускає дві моделі літій-іонних акумуляторів Tesla Powerwall. Одна з них являє собою версію на 10 кВт·год з тижневим циклом, а інша – на 7 кВт·год з щоденним циклом. У 2016 році обмежена версія, Telsa Powerpack 2, коштувала 398 доларів США/кВт·год для зберігання електроенергії, вартістю 12,5 цента/кВт·год (середня ціна на енергосистему США), що позитивно позначалося на рентабельності інвестицій, якщо ціни на електроенергію не перевищували 30 центів/кВт·год [20-50].

Компанія *Enphase Energy* анонсувала інтегровану систему, яка дозволяє домашнім користувачам зберігати, контролювати і керувати електроенергією. Система зберігає 1,2 кВт·год енергії і забезпечує 275 Вт/500 Вт вихідної потужності.

Акумуляція енергії вітру або сонця з використанням накопичувача теплової енергії, хоча і менш гнучка, але значно дешевша, ніж батареї. Простий 52-галонний електричний водонагрівач може зберігати приблизно 12 кВт·год енергії для додавання гарячої води або опалення приміщення.

Електромережа і електростанції

Накопичення відновлюваної енергії

Найбільший запас відновлюваної енергії надається зараз гідроелектростанціями. Велике водосховище поблизу гідроелектростанції може зберігати досить води, щоб усереднити річний стік річки між сухим і вологим сезонами. Хоча гідроелектростанція не накопичує безпосередньо енергію від переривчастих джерел, вона врівноважує енергосистему, утримуючи воду, коли енергія генерується сонячним випромінюванням або вітром [20-50].

Важливий напрямок накопичення енергії – гідроакумуляційні електростанції. Такі регіони, як Норвегія, Уельс, Японія і США експлуатують географічні особливості, використовуючи електричні насоси для заповнення

резервуарів. За потреби вода проходить через генератори і перетворює гравітаційний потенціал води, що падає, на електрику.

Серед видів енергонакопичувачів, використовуваних при виробництві електроенергії, слід зазначити гідроелектростанції з насосним накопичувачем, акумуляторні батареї, теплові енергонакопичувачі (зокрема, розплавлені солі), які можуть ефективно зберігати і вивільняти дуже велика кількість теплової енергії, і сховища енергії на стисненому повітрі, маховики, кріогенні системи і надпровідні магнітні котушки.

Надлишкова потужність також може бути перетворена на метан (реакція Сабатьє) з нагромадженням у мережі природного газу.

У 2011 році Адміністрація енергетики Бонневілля (північний захід США) розробила експериментальну програму з поглинання надміру вітрової і гідроенергії, що генеруються вночі або під час штормових періодів, супроводжуваних сильними вітрами. За наявності центрального управління побутові прилади поглинають надлишкову енергію, нагріваючи керамічну цеглу в спеціальних обігрівачах до сотень градусів і підвищуючи температуру в резервуарах з підігрівом гарячої води. Після заряджання прилади забезпечують опалення будинку та подачу гарячої води у міру потреби. Експериментальна система була створена з урахуванням наслідків сильного шторму 2010 року, який довів ситуацію до перевиробництва відновлюваної енергії в такій мірі, що всі звичайні джерела енергії були закриті, або в разі АЕС – скорочені до мінімально можливого робочого рівня, залишаючи велику область майже повністю на поновлюваних джерелах енергії.

Ще один просунутий метод, який використовувався в колишньому проекті Solar Two в Сполучених Штатах і Solar Tres Power Tower в Іспанії, використовує розплавлену сіль для зберігання теплової енергії, одержуваної від Сонця, а потім перетворює її і віддає у вигляді електричної енергії. Система перекачує розплавлену сіль через вежу або інші спеціальні трубопроводи, які нагріваються сонцем. Ізольовані резервуари зберігають розчин. Електрика виробляється шляхом перетворення води на пару, яка подається в турбіни.

З появою і застосуванням рекуперації (повернення виробленої електроенергії в мережу) потреба в енергоакумуляторах відпала або втрачає свою актуальність.

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» [20-50].

Причиною прояву ефекту пам'яті є укрупнення кристалічних утворень активної речовини акумулятора і, як наслідок, зменшення площі активної поверхні його робочої речовини. Чим дрібніше кристалічні утворення активної речовини акумулятора, тим більше площа поверхні кристалічних утворень, а, отже, і максимальна кількість енергії, що запасається акумулятором, відповідно, при укрупненні кристалічних утворень в процесі експлуатації – площа їх поверхні зменшується, при цьому зменшується максимальний струм розряду і збільшується внутрішній опір елемента. Великі й гострі кристали також значно зменшують відстань між електродами, що призводить до більшого саморозряду елемента. Такі кристали можуть також проткнути сепаратор, що призведе до незворотного пошкодження гальванічного елемента.

Впливу ефекту пам'яті схильні NiCd-акумулятори і, меншою мірою, NiMH-акумулятори.

Уникнути ефекту пам'яті можна, якщо дотримуватися режиму використання акумулятора: доводити акумулятор до майже повної розрядки і тільки після цього його заряджати знову. Бажано також не перевищує рекомендовані заводом-виробником режими заряду і розряду.

Певною мірою дія ефекту пам'яті зворотня: «тренування» акумулятора, тобто, кілька циклів заряду до максимально можливої ємності і подальшого повного розряду може призводити до відновлення максимальної ємності до

вихідного або близького до нього рівня. Дуже гарні результати показує метод заряду акумуляторів змінним асиметричним струмом.

Деякі сучасні зарядні пристрої мають функцію «дорозряда» акумуляторів перед зарядкою. При її активізації акумулятор перед зарядкою підключається до навантаження і розсіює на ній залишок заряду. Блок зарядки включається тільки після того, як буде зафіксовано різке падіння струму через навантаження, яке свідчить про повну розрядку.

Цей список групується за типами батарей.

Таблиця 1.2 – 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-двооксисульфатно-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 ₂ O ₅) – Літій-двоокис сірки (LiSO ₂) – Літій-трьохокис молібдену (LiMoO ₃) – Літій-фторид міді (CuF ₂) – Літій-хромат срібла (LiAg ₂ 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 Даніеля Daniell cell	
Комірки Гальвані Galvanic cell	
Комірки Лекланше Leclanché cell	
Комірки Вестона Weston cell	
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.

Циліндричні елементи

Найбільш поширені циліндричні елементи живлення. Позитивним електродом є виступ на основі циліндра, його діаметр становить близько третини діаметра самого елемента, негативним електродом є плоский або рельєфний

контакт на протилежній основі. Батареї цих типів зазвичай поміщені в пластмасовий або металевий корпус, ізолюваний від циліндричного електрода батареї (негативного у сольових елементів і позитивного – у лужних) для запобігання короткого замикання, а також для захисту його від корозії.

Таблиця 1.3 – Позначення акумуляторів

Вид	Позначення	Типова ємність, мА·год	діаметр x довжина, мм	Примітка
Сольова	A		17 x 50	
Лужна				
Сольова	AA	1100	14,5 x 50,5	Елементи такого типорозміру виробляють з 1907 року і є найбільше поширеними
Лужна		2700-3000		
(Li-FeS ₂)		3000-3500		
(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, безпроводних 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

Мініатюрні елементи

Мініатюрні елементи живлення (так звані «монетки», «гудзики», «годинникові батарейки») застосовуються в малогабаритних пристроях, таких, як наручні годинники, калькулятори, світлодіодні ліхтарики, лазерні указки та т.п. Вони являють собою циліндр, висота якого менше діаметра. Позитивним електродом в них є корпус елемента, а негативним — кругла контакт на одній з основ, діаметром трохи менше діаметра самого елемента. Такі елементи необхідно берегти від маленьких дітей, оскільки вони можуть легко їх проковтнути, що може привести до отруєння і електричних опіків травного тракту [20-50].

Срібло-цинкові елементи

Срібло-цинкова батарея мають масу переваг в порівнянні з марганцево-цинковими: більш висока напруга, яке стабільно тримається до кінця розряду, низький внутрішній опір і т.д., проте через дорожнечу випускаються в основному у вигляді мініатюрних елементів. У таблиці представлені два різновиди срібно-цинкових елементів:

- LD – для електроприладів з низьким і рівномірним енергоспоживанням.
- HD – для електроприладів з високим і нерівномірним енергоспоживанням.

1.2 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. Вископні 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].

У двадцятому столітті електрика вироблялося, перш за все, за рахунок спалювання вископного палива. Проблеми з транспортуванням енергії, забрудненням повітря і глобальним потеплінням привели до зростання використання поновлюваних джерел енергії – таких, як сонячна енергія та енергія вітру. Енергія вітру залежить від кліматичних умов і погоди. Сонячна енергія залежить від географічного положення, хмарного покриву. Вона доступна тільки в денний час, в той час, як попит часто досягає піку після заходу сонця. Інтерес до накопичення енергії з цих джерел зростає, оскільки саме вони останнім часом генерують все більшу частину світового енерговиробництва.

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].

Науковці і інженери розробили декілька комерційно важливих типів батарей. Комірки із рідким електролітом були відкритими контейнерами, в яких містилася рідина (електроліт) і металеві електроди. Коли батарея повністю вичерпувалася, вона оновлювалася шляхом заміни електроліту і електродів. Відкриті контейнери були не придатні для мобільного чи переносного використання. Такі батареї мали комерційне використання у телеграфних та телефонних системах. Перші електричні автомобілі використовували напівгерметичні батареї з рідким електролітом.

Одна із важливих класифікацій батарей стосується їх життєвого циклу. «Первинні» батареї можуть виробляти струм одразу після їх виготовлення, однак як тільки активні елементи вичерпаються, їх не можна зарядити за допомогою електрики знов. Розвиток свинцево-кислотних акумуляторів і наступних за ними «вторинних» або «перезаряджуваних» типів батарей, дозволили здійснювати відновлення енергії комірки, що дозволило продовжити термін служби зібраних комірок. Поява батарей на основі нікелю і літію в кінці 20-го століття дало можливість створювати незліченну кількість портативних електронних пристроїв, починаючи від потужних ліхтарів закінчуючи мобільними телефонами. Дуже великі стаціонарні батареї знайшли своє застосування у мережевих сховищах енергії, де вони допомагають стабілізувати мережі розподілу електроенергії.

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.

Вольта вважав, що струм виникає в результаті того, що два різні матеріали просто торкаються один одного через існування деякої контактної напруги – застаріла наукова теорія – а не в результаті хімічних реакцій. Як наслідок, він вважав що корозія цинкових пластин не є недоліком, що із цим пов'язаний, який можливо можна було б усунути заміною матеріалів якимось чином. Однак, жоден вчений так і не досяг успіху у спробах запобігти цій корозії. Насправді, відповідно до спостережень корозія відбувалася швидше, при утворенні більшого струму. Це стало свідченням того, що корозія була є важливою частиною процесу, що пов'язана зі здатністю батареї виробляти струм. Це, частково, призвело до відмови від теорії контактної напруженості Вольта на користь електрохімічної теорії. Відповідно до ілюстрацій Вольта із його Коронаю із Чашами і вольтового стовпа, вони мають додаткові металеві диски зверху і знизу, що як відомо зараз не є необхідними. Зображення, що належить до цього розділу із вольтовим стовпом із цинку і міді мають сучасний дизайн, що вказує на те, що "контактна напруга" не є джерелом електрорушійної сили для вольтового стовпа.

Оригінальні моделі вольтового стовпа, які створив Вольта, мали деякі технічні недоліки, один з яких був пов'язаний з протіканням електроліта через значну вагу дисків, які стискали тканину змочену в ропі, що спричиняло короткі замикання. Шотландський дослідник на ім'я Вільям Крюкшенк розв'язав цю проблему поклавши елементи у коробці замість того, щоб укладати їх у стопку. Сам Вольта винайшов варіант, який складався із ланцюжка банок наповнених солоним розчином, сполучених між собою металевими дужками, що занурювалися у рідину. Цей варіант батареї був відомий як Корона із чаш. Її металеві дужки були зроблені із двох різних металів (цинку і міді) спаяних між собою. Ця модель також довела свою кращу ефективність в порівнянні із початковими стовпцями, хоча не стала популярною.

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 якого покривалася деякою кількістю ртуті, не мала недоліку із локальною дією.

Незважаючи на ці недоліки, батареї Вольта забезпечували більш стабільний струм, ніж Лейденські банки, і дали дорогу багатьом новим експериментам і відкриттям. Наприклад завдяки цим батареям Ентоні Карлайл і Вільям Ніколсон провели перший електроліз води [20-50].

Комірка Деніелла

Британський хімік на ім'я Джон Фредерік Даніелл 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 Деніелла, 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 Деніелла була значно кращою, у порівнянні з існуючою на той час технологією, що використовувалася на початку розвитку батарей і була першим практичним джерелом електричної енергії. Вона забезпечувала надійніший струм, ніж комірка Вольта. Також вона була безпечнішою і менш корозійною. Вона мала робочу напругу приблизно 1,1 Вольта. Згодом це стало промисловим стандартом, що використовувався в основному у нових мережах телеграфного зв'язку.

Комірка Деніелла також використовувалася на той час як робочий стандарт для визначення одиниці вимірювання Вольт, яка є одиницею вимірювання електрорушійної сили [20-50].

Комірка Бьорда

Одну із версій батареї, подібну до комірки Деніелла 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 Деніелла 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 занурювалась 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 катоду 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 хромово 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 забезпечувала напругу в 1,9 вольт. Вона була популярною серед експериментаторів протягом багатьох років, через відносно високу вихідну напругу; кращу здатність генерувати постійний струм і відсутність будь-яких парів, але через відносну крихкість тонкого скляного корпусу і необхідність підіймати цинкову пластинку, коли батарея не використовується з рештою виходила з ладу. Цю комірку також відома як 'комірка із хромовою кислотою', а за головним принципом як 'біхроматна комірка'. Друга назва походить від практики отримання хромової кислоти шляхом додавання сірчаної кислоти до біхромату калію, хоча сама комірка не містила дихромата.

На основі комірки Поггендорфа пізніше була створена комірка Фуллера. Хоч хімічний процес її був по суті однаковим, дві кислоти знову були розділені пористим контейнером, а цинк був оброблений ртуттю, утворюючи амальгаму.

Комірка Грова

Валлійський винахідник Вільям Гров винайшов свою батарею у 1839 році. Вона складалася із цинкового анода, який занурювався у сульфатну кислоту і

з платиного 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 катода 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 Форе 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.

В порівнянні із іншими батареями, батареї Планте були важкими і громіздкими через кількість енергії, яку вони могли утримувати. Однак вони

могли утворювати значно більший струм у перенапрузі. Вона мала дуже не великий внутрішній опір, завдяки чому однією батареєю можна було жити декілька електричних ланцюгів.

Свинцево-кислотні батареї можуть використовуватися і досі в автомобілях і в інших областях застосування, де вага батареї не є визначальним фактором. Її основні принципи роботи не змінювалися з 1859 року. На початку 1930-их, почали виробляти гелевий електроліт (замість рідкого), шляхом додавання діоксиду кремнію до зарядженої комірки, і це використовувалося у анодних батареях переносних радіостанціях із вакуумними трубками. У 1970-их, більш типовими стали "запаковані" версії (що загалом називалися "гелевими батареями" або "SLA"), це дозволяло використовувати батарею в різних положеннях без відмови чи протікання.

Сьогодні батареї належать до класу "первинних", якщо вони виробляють струм доки їх хімічні реактиви не будуть виснажені, і до "вторинних", якщо хімічні реакції можна відновити перезарядженням батареї. Свинцево-кислотні комірки були першими в світі "вторинними" батареями [20-50].

1.3 Світові тенденції розвитку та застосування систем накопичення електричної енергії

За даними сайту ecotown.com.ua та інших сучасних інформаційних ресурсів наведено світові тенденції розвитку та застосування систем накопичення електричної енергії [30-55].

В Нідерландах побудували сховище ємністю 20 МВт·год для зберігання надлишку «сонячної» електроенергії

Нещодавно в Нідерландах міжнародна енергетична компанія AES ввела в експлуатацію сховище електроенергії ємність 20 МВт·год, під'єднане до єдиної енергосистеми країни.

Сховище з 45 тисяч літій-іонних батарей SDI від південнокорейської Samsung призначене для зберігання надлишку електроенергії, що виробляється

переважно вдень сонячними електростанціями, та її використання в нічні години, повідомляє ресурс Teslaes.

Якщо популярність вітряної і сонячної енергетики продовжить в майбутньому зростати, такі сховища електроенергії візьмуть на себе роль електростанцій в нічний і безвітряний час», - зазначив представник голландського системного оператора TenneT.

Нагадаємо, що у 2020 році американська компанія SolarCity планує розпочати на Гаваях будівництво електроакумулюючої станції ємністю 52МВт·год із акумуляторів Tesla Powerpack [30-55].

У Великобританії будують накопичувач енергії на основі зрідженого повітря

Неподалік британського містом Манчестер почалося спорудження найбільшого накопичувача енергії. Він працюватиме на основі зрідженого повітря і дозволить компенсувати спад генерації відновлюваних джерел енергії (вітряків та сонячних панелей). За кількістю збереженої енергії проект поступається лише гідротехнічним схемам, в яких на поверхні планети створюють гігантські водні резервуари, повідомляє Techtoday.

Накопичувач використовуватиме надлишки згенерованої «зеленими» електростанціями енергії для зрідження повітря. При спаді виробітку електрики газ випускатиметься з резервуарів для обертання турбіни.

Система, яку розробляє компанія Highview Power, здатна накопичити 250 МВт·год енергії. Цього вистачить для живлення 200 тисяч домівок протягом п'яти годин. Вона також здатна з мінімальними втратами зберігати накопичену енергію протягом багатьох тижнів. Розробка Highview Power запрацює у 2022 році. Її перевагою є можливість спорудження в будь-якому регіоні планети.

Одним із альтернативних рішень для зберігання енергії є гігантські хімічні акумулятори. Ємність системи Highview удвічі більша за найбільшу таку батарею, споруджену компанією Tesla в Південній Австралії. Вартість проекту Highview склала близько \$100 млн. Ресурс розробки складає 30-40 років.

У Каліфорнії (США) побудують п'ять систем накопичення енергії

У штаті Каліфорнія (США) побудують п'ять розподілених систем накопичення енергії на базі акумуляторних батарей (Battery Energy Storage System, BESS).

Проекти на узгодження галузевому регулятору штату (California Public Utilities Commission, CPUC) направила американська Pacific Gas and Electric Co. (PG&E) – найбільша дочірня компанія холдингу PG&E Corporation, зайнята у сфері виробництва, передачі і розподілу електроенергії у штаті Каліфорнія, передає ruscable.

Накопичувачі енергії сумарною потужністю 423 МВт, а енергоємністю – 1692 МВт·год розраховані на чотиригодинний цикл розрядки. Введення п'яти об'єктів в експлуатацію намічене на серпень 2021 року [30-55].

Американські вчені розробили ефективний натрій-іонний акумулятор

Американські фахівці домоглися відмінних результатів у створенні натрій-іонного акумулятора. Його ємність на рівні середніх літій-іонних акумуляторів та після 1000 циклів він зберігає понад 80% енергії. Вчені вважають, що ці дешеві і безпечні акумулятори зможуть стати новим стандартом, передає Хайтек.

Літій-іонні акумулятори можна знайти всюди – від смартфонів до електромобілів. Однак матеріали, з яких вони виготовлені – кобальт і літій – рідкісні, дорогі і важкодоступні. І чим вищий попит на електроенергію, тим дорожчими вони будуть. Щодо натрій-іонних, то сировина для них є всюди, вона дешева, а видобуток не завдає шкоди природі. На жаль, вони не можуть утримати стільки ж енергії, як літій-іонні. Ще однією проблемою є перезарядка. У найбільш перспективних катодів для натрій-іонних акумуляторів під час зарядки утворюється шар неактивних кристалів натрію, який заважає потоку іонів і, в результаті, знищує акумулятор.

Команда вчених з Університету штату Вашингтон і Тихоокеанської північно-західної національної лабораторії розробила натрій-іонний акумулятор, що зберігає стільки ж енергії, що і літій-іонний, а працює не гірше.

Рішенням вчених стало створення нашарованого катода з окисел металу і рідкого електроліту з додатковими іонами натрію. Такий солоний розчин краще

взаємодіє з катодом. Дизайн катода і система електроліту дозволяють іонам натрію постійно рухатися, запобігаючи утворенню кристалів. Випробування показали, що ємність натрій-іонної батареї не поступається літій-іонній, і вона зберігає понад 80% енергії після 1000 циклів заряду і розряду.

Вчені переконані, що така технологія може бути не менш життєздатна, ніж літій-іонні акумулятори [30-55].

США за два роки побудує 56 нових систем зберігання енергії з сонячними і вітровими станціями

На промислових сонячних та вітрових електростанціях США встановлять 56 нових систем накопичення енергії до 2023 року.

Про це йдеться у прогнозі Управління енергетичної інформації США (EIA), передає rener.

За даними EIA, хоча найбільш поширеним застосуванням систем накопичення енергії, що розміщуються спільно з ВДЕ-електростанціями, є накопичення «надлишкової» енергії, більшість систем зберігання енергії виконує більше однієї функції. Типові функції потрапили у статистику систем накопичення енергії представлені на наступному графіку.

Управління енергетичної інформації підкреслює, що майже 25% від загальної потужності батарей у США встановлено «в парі» з сонячними і вітровими електростанціями, і тільки 1% від загальної потужності вітрових і 2% від загальної потужності фотоелектричних станцій є частиною гібридної системи.

Згідно з даними, майбутні проекти будуть набагато більшими, ніж нинішні. Наприклад, новий проект Gemini, який повинен бути реалізований до кінця 2022 року – це сонячна електростанція потужністю 690 МВт з системою накопичення енергії (літій-іонні батареї) 380 МВт/1400 МВт·год [30-55].

EIA зазначає, що до кінця 2023 року середня потужність ВДЕ на пропонованих об'єктах в США зросте більш, ніж удвічі з 34 МВт до 75 МВт, а середня потужність систем накопичення енергії – з 5 МВт до 36 МВт.

На чотирьох українських ГЕС планують побудувати системи накопичення енергії загальною потужністю 200 МВт

В Україні на території чотирьох гідроелектростанцій планують побудувати системи накопичення енергії загальною потужністю 200 МВт.

Як повідомив гендиректор ПрАТ "Укргідроенерго" компанії Ігор Сирота, техніко-економічне обґрунтування об'єктів планують розробити до кінця 2020 року, передає expro.com.ua.

У 2020 році Китай збільшить потужності сховищ для відновлюваної енергії на 400 МВт

У 2020 році Китай встановить нові системи зберігання відновлюваної енергії потужністю понад 400 МВт.

Як впливає із зробленого Bloomberg прогнозу, такий показник у чотири рази перевищить минулорічний, передає energosmi.

Основна частина очікуваного збільшення припадатиме на проекти вітер у поєднанні із зберіганням у Хунані і Аньхої, де місцеві мережі домовилися про пріоритетне підключення для гібридних проектів для уникнення перевантаження.

На даний момент 28 компаній, серед яких, зокрема, China Huaneng Group і China Three Gorges Renewables Group Co., будують нові енергосховища у Хунані потужністю 389 МВт, які будуть введені в експлуатацію спільно з новими ВЕС потужністю 1,9 ГВт [30-55].

Найбільші державні компанії Китаю вкладають мільярди доларів у будівництво масштабних проектів, які включають встановлення сонячних та вітрових станцій разом із системами зберігання енергії. Зокрема, GD Power Development Co планує інвестувати \$2 млрд у будівництво на півночі Монголії сонячно-вітрової станції із системою зберігання енергії загальною потужністю 2 ГВт. Beijing Jingneng Power Co. інвестує \$3 млрд у аналогічний проект потужністю 5 ГВт. Обидва передбачають виробництво водню на відновлюваній електроенергії.

Корпорація State Power Investment Corp. планує побудувати у північній провінції Шаньсі гібридну станцію вартістю \$1 млрд з СЕС потужністю 1 ГВт, ВЕС потужністю 300 МВт і сховищем для зберігання енергії потужністю 100 МВт.

У Саудівській Аравії побудують завод з виробництва ванадієвих акумуляторів для відновлюваної енергетики

У Саудівській Аравії побудують завод з виробництва ванадієвих проточних батарей [30-55].

Проект у промисловому місті Даммам-3 на сході країни реалізує німецький постачальник виробничого обладнання Schmid Group спільно з Nusaned Investment, підрозділ Саудівської хімічної компанії Sabic, яка, в свою чергу, є дочірнім підприємством нафтового гіганта Saudi Aramco, передає renep.

Завод вироблятиме ванадієві проточні акумулятори для проектів відновлюваної енергетики, інтеграції ВДЕ, телекомунікаційних веж, гірничодобувних об'єктів, віддалених та ізольованих територій, оптимізації потужності дизель-генераторів і резервного електропостачання. Системи накопичення енергії будуть продаватися під брендом Everflow.

Завод матиме річну виробничу потужність у 3 ГВт-год і стане одним з найбільших в світі заводів з виробництва ванадієвих проточних батарей.

Проектна площадка вже визначена. Пропонований виробничий комплекс і науково-дослідний центр зведуть у промисловій зоні Даммам. Будівництво почнеться у першій половині 2020 року.

До 2030 року Саудівська Аравія планує встановити 57,5 ГВт відновлюваних потужностей. Стаціонарні системи зберігання енергії будуть мати вирішальне значення для інтеграції «зелених» станцій в енергосистему.

Проточний (або потоковий) акумулятор - це електрохімічний накопичувач енергії, в якому енергія виробляється завдяки взаємодії двох рідких компонентів, розділених мембраною. Компоненти (електроліти) зберігаються у окремих ємностях і прокачуються через паливну комірку за допомогою насоса. В результаті хімічної взаємодії виробляється електроенергія.

У Японії розробили зарядку для електромобілів потужністю 500 кВт і скоротили заправку до 5 хвилин

Japan Electric Vehicle Fast Charger Association розробила швидкісну зарядку для електромобілів потужністю 500 кВт.

Компанія оновила протокол стандарту швидкої зарядки CHAdeMO до версії 3.0, скоротивши час зарядки до 5 хвилин, передає ІТС.ua.

Швидкість зарядки скоротилася за рахунок підвищення потужності аж до 500 кВт (при максимальній силі струму 600А). Можливість передачі енергії такої високої потужності робить процес зарядки електромобіля за часом рівноцінним процедурі заправки автомобіля з двигуном внутрішнього згорання бензином або дизпаливом. За приблизними підрахунками, всього за п'ять хвилин на зарядній станції, що відповідає специфікації CHAdeMO 3.0 можна буде зарядити батарею електромобіля настільки, щоб подолати понад 200 км шляху. При цьому 10 хвилин підключення до CHAdeMO 3.0 повинно забезпечити повну зарядку середньостатистичного електрокара.

Нова версія стандарту розроблялася спільно з Радою електрики Китаю (China Electricity Council). Як наслідок, CHAdeMO 3.0 сумісний з Національним китайським стандартом для зарядки електромобілів GB/T, що створює сприятливі умови для більш широкого застосування. Крім того, в організації відзначили, що в результаті CHAdeMO 3.0 може бути сумісний з Combined Charging Standard (CCS).

Само собою, CHAdeMO 3.0 також встановлює певні вимоги до сумісних зарядних станцій. Станції CHAdeMO нового покоління будуть виділятися новим коннектором, кабелем меншого діаметру з рідинним охолодженням і відсутністю механізму блокування [30-55].

В Монголії збудують систему акумулювання енергії потужністю 125 МВт

Азіатський банк розвитку схвалив кредит у розмірі 100 мільйонів доларів для встановлення в Монголії розширеної системи акумулювання потужністю 125 МВт. Проект розрахований на загальну суму 114,95 млн. доларів. З цієї суми 3 мільйони доларів США при співфінансуванні надходять від технологічного фонду АБР, що фінансується урядом Японії. Уряд Монголії виділить на проект 11,95 мільйонів доларів, повідомляє news.mn [30-55].

Акумуляторна система зможе подавати 44 ГВт·год пікової потужності щорічно. Система також підтримає інтеграцію додаткових 859 ГВт·годин відновлюваної електроенергії в мережу. Це дозволить уникнути 842,039 тонн викидів вуглекислого газу на рік до 2025 року. Система акумулявання має запрацювати у вересні 2024 року. Монголія має на меті збільшити частку відновлюваних джерел енергії до 20% до 2023 року та 30% до 2030 року.

У Німеччині встановили понад 200 тисяч домашніх накопичувачів енергії

У Німеччині встановлено 206 тисяч систем накопичення енергії у приватних помешканнях.

Згідно з аналізом EuPD Research, таких показників країна досягла за минулі два роки, передає repen.

Так, у 2019 році у Німеччині було встановлено близько 65000 домашніх систем накопичення енергії, на 20 тисяч більше, ніж роком раніше.

Значне збільшення попиту на зберігання енергії, за словами аналітиків, обумовлене стрімким встановленням домашніх сонячних електростанцій потужністю 3 -10 кВт. Згідно з аналізом EuPD, майже 90% усіх нових приватних фотоелектричних систем у даний час встановлюються разом з домашньою системою зберігання енергії. Крім того, все частіше накопичувачі купуються для модернізації існуючої сонячної електростанції [30-55].

У Австралійці створили батарею, з якою електромобіль матиме запас ходу 2 тис км

Австралійські фахівці розробили літій-сірчані акумулятори, які дозволить створити електромобілі із запасом ходу близько 2 тис. км.

Про готовність почати промислові випробування оголосила австралійська компанія Brighsun New Energy, передає ukrautoprom.com.ua.

Щільність зберігання енергії у Li-S батареї Brighsun перевищує стандарти літій-іонних джерел струму у п'ять-вісім разів.

Незалежні дослідження показали, що Brighsun зберігає 91% початкової ємності після 1700 циклів перезарядки струмом 2C (повна зарядка/розрядка за 30

хвилин). Це означає, що зниження продуктивності за цикл становить всього 0,01%.

Навіть при більш агресивній швидкості 5C (будучи повністю зарядженою/розрядженою за 12,5 хвилин), Li-S батарея Brighsun зберігає 74% своєї початкової ємності після 1000 циклів (зниження ємності за цикл 0,026%).

Наразі компанія, яка розробляла нову батарею вісім років, обговорює з потенційними інвесторами великомасштабне пробне виробництво Li-S акумуляторів. Очікується, що процес розробки великомасштабного виробництва буде завершено до кінця цього року, після чого почнеться масове виробництво Li-S акумуляторів.

Передбачається, що новий енергозберігаючий літій-іонний акумулятор Brighsun прискорить використання електромобілів в усьому світі, чому сприяють радикально поліпшені характеристики при роботі від однієї зарядки, низька вартість і тривалий термін служби.

Як заявляють в компанії, батареї Li-S також можуть стати найбільш перспективною системою зберігання енергії для майбутніх залізниць, суден і авіакомпаній [30-55].

У Іспанії пропонують зберігати «зелену» електроенергію завдяки рідкому повітрю

У Іспанії розробили метод зберігання електроенергії отриманої з поновлюваних джерел за допомогою рідкого повітря.

Дослідження проводить Вища технічна школа інженерного та промислового дизайну (ETSIDI) Мадридського політехнічного університету (UPM) з метою інтеграції «зеленої» енергії в електричну мережу, передає energosmi.

Цикл зберігання енергії за допомогою рідкого повітря або LAES (Liquid Air Energy Storage) складається з двох фаз, що відповідає зберіганню (зарядці) і подальшій рекуперації енергії (розрядці). У фазі зарядки енергія, витягнута з поновлюваних джерел, використовується для зрідження атмосферного повітря, яке буде зберігатися при температурі -190°C в термічно ізольованому резервуарі.

У фазі розвантаження частина накопиченої енергії витягується шляхом випаровування повітря і розширення його у різні турбіни.

Для підвищення ефективності процесу навантаження і розвантаження (і, в кінцевому рахунку, циклу) відновлюється, з одного боку, частина холоду, що поступає повітрям у процесі випаровування. Повітря зберігається у резервуарі з компактним шаром каменів для подальшого використання у процесі охолодження стисненого повітря. З іншого боку, тепло, витягнуте при стисненні, використовується термомаслом, яке пізніше буде використовуватися для розігріву повітря перед його обробкою [30-55].

У порівнянні з іншими технологіями зберігання енергії LAES має такі переваги, як висока щільність енергії (накопичена енергія на одиницю об'єму) і масштабованість. Крім того, на відміну від зберігання енергії гідравлічним накачуванням і стисненим повітрям, LAES не має географічних або екологічних обмежень; і дозволяє зберігати більше енергії, ніж батареї.

Згідно з проведеним дослідженням, оціночні витрати на електроенергію і зберігання становлять 150 €/МВт·год і 50 €/МВт·год відповідно.

У Пілсворті (Великобританія) компанія Highview Power вже встановила першу у світі установку зі зберігання відновлюваної енергії на рідкому повітрі.

У Китаї розробили електромобільні акумулятори з 16-річним терміном служби

Китайці вже готові налагодити виробництво акумуляторів, які будуть працювати протягом 16 років і дозволять долати до 2 млн кілометрів.

Про готовність почати випуск нового покоління акумуляторів, що відрізняються рекордним терміном служби оголосив найбільший китайський виробник тягових батарей для електромобілів Contemporary Ampereх Technology (CATL), передає virtualbrest.

Згідно з інформацією Bloomberg, нові батареї безвідмовно прослужать 16 років, забезпечивши пробіг близько 2 мільйонів кілометрів. Для порівняння: на даний момент гарантія на батареї складає 8 років, а пробіг – 150 тис. кілометрів.

При цьому нова батарея буде коштувати всього на 10% дорожче старої моделі, тому заміна серйозно не позначиться на кінцевій вартості автомобіля, але зробить його більш зручним в експлуатації.

Інших параметрів, включаючи запас ходу, в CATL поки не розкривають.

Наразі виробникам електрокарів достатньо лише оформити замовлення.

CATL поставляє елементи для тягових батарей концернам BMW, Daimler, Honda, Toyota, Volkswagen і Volvo, а з американською Tesla і співпрацює у справі розробки принципово нових осередків, які могли б використовуватися для випуску довговічних блоків зі значним запасом ходу.

Audi створила зарядну станцію зі старих батарей від електрокарів

Компанія Audi розробила контейнерну систему зарядки зі старих батарей від електромобілів e-tron [30-55].

Проект німецька автомобілебудівна компанія реалізувала спільно зі Швейцарською енергетичною компанією ABB, передає Автоцентр.

Система складається з трьох зарядних контейнерів, кожен з яких оснащений чотирма використаними акумуляторами Audi e-tron.

Загальна зарядна ємність терміналу становить 700 кВт, а ємність зберігання дорівнює 1 МВт/год. Одночасно на станції можуть заряджатися до 20 електромобілів. На швидку зарядку потрібно всього 15 хвилин.

Розробка допоможе не тільки повторно використовувати акумулятори, а й вирішить проблему зарядної інфраструктури у віддалених районах.

В Оксфорді встановлять 52-мегаватну гібридну систему зберігання енергії для переходу на електромобілі

У місті Оксфорд(Велика Британія) встановлять літій-іонний акумулятор потужністю 50 МВт і ванадієвий редокс-акумулятор потужністю 2 МВт для переходу на електромобілі.

Проект у рамках реалізації плану перебудови транспортної інфраструктури міста реалізує британський енергетичний інноватор Pivot Power, дочірня компанія EDF Renewables UK, передає energosmi.

Ця гібридна комбінація об'єднає потужні можливості літій-іонної батареї з неруйнівними властивостями технології окислювально-відновного потоку ванадію і створить надійну систему, здатну задовольнити складні енергетичні потреби району [30-55].

Habitat Energy забезпечить оптимізацію системи на основі ML (машинного навчання), що дозволить їй більш ефективно задовольняти потреби в електроенергії та оптимізувати інтеграцію поновлюваних джерел енергії у мережу. Літій-іонний акумулятор потужністю 50 МВт і ванадієвий редокс-акумулятор потужністю 2 МВт постачатиме Invinity Energy.

План перебудови транспортної інфраструктури Оксфорда покликаний прискорити перехід на електромобілі, першу партію яких міська рада отримала у рамках Energy Superhub Oxford(ESO), ініціативи Світового класу з декарбонізації енергії та транспорту по всьому місту.

Проект вартістю 41 млн фунтів стерлінгів фінансуватиметься протягом трьох років ESO, яка є частиною урядового плану «процвітання завдяки енергетичній революції» (PERC).

В Україні запуснуть пілотний проект energy storage на базі Запорізької ТЕС

До кінця 2020 року на базі Запорізької теплоелектростанції побудують системи накопичення електричної енергії (energy storage).

Пілотний проект планує запустити енергохолдинг ДТЕК, передає expro.com.ua.

Балансуючі потужності – це важлива складова трансформації галузі.

Total побудує систему накопичення енергії потужністю 25 МВт

Компанія Total побудує поблизу порту Дюнкерк (Франція) систему накопичення енергії на основі літій-іонних батарей потужністю 25МВт і ємністю 25 МВт·год. Проект реалізується за результатами конкурсного відбору, проведеного французьким системним оператором RTE. Постачальником рішення є Saft, дочірня компанія Total. Це буде найбільша система накопичення енергії на

основі літій-іонних батарей. Система Intensium Max 20 High Energy складається з 11 контейнерів, що містять 2,3 МВт·год кожен.

Система накопичення енергії буде використовуватися для надання послуг швидкого резерву з метою підтримки стабільності французької енергосистеми. Як зауважують у компанії, Total створює портфель низьковуглецевих електроенергетичних проектів, на частку яких має припадати 15-20% продажів компанії до 2040 року [30-55].

Стаціонарні акумуляторні установки електростанцій

Під час експлуатації акумуляторних установок повинні бути забезпечені їх тривала надійна робота і необхідний рівень напруги на шинах постійного струму в нормальних і аварійних режимах. В аварійних режимах акумуляторні батареї (АБ) повинні забезпечити роботу устаткування не менше ніж протягом 1 години з необхідним рівнем напруги. Під час приймання вперше змонтованої або після капітального ремонту АБ повинні бути перевірені [30-55]:

- якість електроліту за результатами аналізу проб, взятих в кінці контрольної розрядки;
- густина електроліту, приведена до температури 20 град.С;
- ємність АБ після десятигодинної розрядки, приведена до температури 20 град.С;
- напруга елементів наприкінці зарядки та розрядки;
- значення перехідного опору міжелементних перемичок;
- опір ізоляції АБ відносно землі.

Акумуляторні батареї повинні бути введені в експлуатацію після досягнення ними 100 % номінальної ємності.

Акумуляторні батареї необхідно експлуатувати в режимі постійної підзарядки. Для АБ типу СК напруга підзарядки повинна становити $(2,2 \pm 0,05)$ В на елемент, для АБ типу СН - $(2,18 \pm 0,04)$ В на елемент. Для інших типів АБ напруга підзарядки на елемент повинна відповідати вимогам заводу-виробника.

Підзарядна установка повинна забезпечувати стабілізацію напруги на шинах АБ з відхиленнями, які не перевищують встановлені заводом-виробником АБ, але не більше ніж 2 % номінальної напруги.

Оптимальні рівні напруги та струму підзарядки повинні бути встановлені інструкцією з експлуатації з урахуванням індивідуальних властивостей кожної АБ. Додаткові елементи АБ, які використовують у роботі не постійно, повинні мати окремий пристрій підзарядки або баластне навантаження, еквівалентне навантаженню основної частини АБ. Їх експлуатують у режимі постійної підзарядки. В аварійному режимі баластне навантаження повинно бути від'єднане.

Кислотні АБ необхідно експлуатувати без тренувальних розрядок і періодичних вирівнювальних перезарядок. Не рідше ніж один раз на рік повинна бути проведена вирівнювальна зарядка АБ типу СК напругою 2,3 - 2,35 В на елемент до досягнення усталеного значення густини електроліту в усіх елементах 1,2-1,21 г/куб.·см при температурі 20 град.С. Тривалість вирівнювальної зарядки залежить від стану АБ і повинна бути не меншою ніж 6 год. Вирівнювальні зарядки АБ типу СН проводять напругою 2,25-2,4 В на елемент після доливання дистильованої води до рівня 35-40 мм над захисним щитком (у разі зниження рівня електроліту до 20 мм над захисним щитком) до досягнення густини електроліту 1,235 - 1,245 г/куб.·см при температурі 20 °С [30-55].

Тривалість вирівнювальної зарядки орієнтовно становить: для напруги 2,25 В – 30 діб, для 2,4 В – 5 діб. За наявності в АБ поодиноких елементів із зниженою напругою та зниженою густиною електроліту (відстаючі елементи) для них необхідно проводити додаткову вирівнювальну зарядку від окремого випрямного пристрою. Для інших типів АБ вирівнювальну зарядку виконують згідно з інструкцією заводу-виробника. Контрольну розрядку АБ для визначення їхньої фактичної ємності (у межах номінальної ємності) на електростанціях і підстанціях необхідно виконувати один раз на 1-2 роки. За умови роботи АБ типу СК на підстанціях, ГЕС або ВРУ електростанцій у режимі потужних поштовхових навантажень перевірку робоздатності АБ за спадом напруги під час короткочасних (не більше ніж 5 с) розрядках струмом 1,5-2,5 струму

одногодинної розрядки (струмом поштовху) виконують один раз на 1-2 роки або один раз на рік (за наявності електромагнітних приводів вимикачів). Напруга повністю зарядженої справної АБ в момент поштовху не повинна знижуватися більше ніж на 0,4 В від напруги в момент, що передує поштовху струму.

У тих випадках, коли кількість елементів АБ недостатня для забезпечення напруги на шинах в кінці розрядки в заданих межах, допускається розряджати АБ на 50-70 % її номінальної ємності або здійснювати розрядку елементів АБ частинами. Значення струму контрольних розрядок та струму поштовху кожного разу повинні бути однаковими. Результати кожного вимірювання необхідно порівнювати з результатами попередніх вимірювань. Їхні значення не повинні відрізнятися більше ніж на 10 %. Контрольні розрядки АБ закритого типу для АЕС виконують один раз на 3 роки, для ТЕС та інших енергооб'єктів - не рідше ніж один раз на 5 років. Для АБ інших типів перевірку роботоздатності виконують згідно з документацією заводу-виробника [30-55].

Заряджати і розряджати АБ допустимо струмом, значення якого є не вищим від максимального для даної АБ. Перед контрольною розрядкою необхідно провести вирівнювальну зарядку АБ.

Температура електроліту під час зарядки АБ не повинна перевищувати 40°C для АБ типу СК і 35 °С – для АБ типу СН. У разі перевищення вказаної температури зарядний струм необхідно знизити. Для інших типів АБ температура електроліту не повинна перевищувати значень, вказаних у документації заводу-виробника.

Контрольні розрядки і перевірку АБ поштовховим струмом необхідно виконувати за затвердженою в установленому порядку програмою. Припливно-втяжна вентиляція приміщення АБ на електростанціях повинна бути увімкнена перед початком зарядки АБ і вимкнена після повного відведення газів, але не раніш ніж через 1,5 год після закінчення зарядки. Порядок експлуатації системи вентиляції у приміщеннях АБ з урахуванням конкретних умов повинен бути визначений інструкцією з експлуатації. Після розрядки АБ наступна її зарядка до ємності, рівної 90 % номінальної, повинна бути здійснена не пізніше ніж за 8 год.

У цьому випадку напруга на АБ може досягати 2,5-2,7 В на елемент. Режим такої зарядки повинен бути визначений інструкцією з експлуатації. У разі застосування випрямних пристроїв для підзарядки і зарядки АБ кола змінного і постійного струму повинні бути з'єднані через розділювальний трансформатор. Під час експлуатації АБ необхідно проводити автоматичний контроль [30-55]:

- опору ізоляції мережі постійного струму;
- рівня напруги на шинах постійного струму;
- наявності струму підзарядки АБ;
- вимкнення АБ;
- вимкнення випрямного пристрою.

Сигналізація несправності кіл постійного струму повинна мати резервне живлення.

Коефіцієнт пульсації на шинах постійного струму не повинен перевищувати допустимих значень, передбачених ТУ заводу-виробника та за умовами живлення пристроїв РЗА та АСК ТП, і приймається за меншою величиною. Вимірювання пульсації постійної напруги підзарядних пристроїв необхідно проводити в терміни, встановлені інструкціями з експлуатації відповідних типів пристроїв. Напругу на шинах постійного струму, що живлять кола керування, пристрої РЗА, у нормальних експлуатаційних умовах допустимо підтримувати на 5 % вищою номінальної напруги електроспоживачів. Усі збірки і кільцеві магістралі постійного струму повинні бути забезпечені резервним живленням. Опір ізоляції АБ вимірюють за спеціальною програмою не рідше ніж один раз на 3 місяці. Пристрій контролю ізоляції на шинах постійного оперативного струму повинен діяти на сигнал після зниження опору ізоляції одного з полюсів до уставки 20 кОм у мережі 220 В, 10 кОм у мережі 110 В, 6 кОм у мережі 60 В, 5 кОм у мережі 48 В, 3 кОм у мережі 24 В. Під час роботи опір ізоляції мережі постійного струму повинен бути не нижчим ніж двохкратне значення вказаної уставки пристрою для контролю ізоляції.

У випадку спрацювання пристрою сигналізації з причини зниження рівня ізоляції відносно землі в колі оперативного струму повинні бути негайно вжиті

заходи для усунення несправностей. У цьому випадку виконання робіт без зняття напруги в цій мережі, за винятком пошуку місця пошкодження ізоляції, заборонене. Аналіз електроліту кислотних АБ типів СК та СН необхідно проводити з усіх елементів після одного року експлуатації і щорічно за пробами, взятими з контрольних елементів. Кількість контрольних елементів повинна бути встановлена технічним керівником енергооб'єкта залежно від стану АБ, але не менша ніж 10 % від їх кількості в АБ.

Контрольні елементи необхідно щорічно змінювати. Під час контрольної розрядки проби електроліту необхідно відбирати наприкінці розрядки. Аналіз електроліту АБ закритого типу не проводять, достатньою є перевірка густини електроліту. Електроди в АБ повинні бути повністю занурені в електроліт. Рівень електроліту в АБ типу СК необхідно підтримувати на 10-15 мм вищим від верхнього краю електродів. Рівень електроліту в АБ типу СН повинен бути в межах від 20 до 40 мм над запобіжним щитком. Якщо доливання проводять після зниження рівня до мінімального, тоді необхідно провести вирівню-вальну зарядку. Для доливання АБ типу СК і СН повинна бути використана дистильована вода, перевірена на відсутність хлору і заліза. Можна також допустити використання конденсату пари, який відповідає вимогам чинних НД щодо якості дистильованої води. Для доливання інших типів АБ повинна бути використана дистильована вода, яка відповідає вимогам заводів-виробників. Для зменшення випару баки АБ типів СН і СК повинні бути накріті пластинами зі скла або іншого прозорого ізоляційного матеріалу, який не вступає в реакцію з електролітом. Використання оливи для цього забороняється. Температуру в приміщенні АБ на рівні їхнього розташування необхідно підтримувати не нижче ніж 10 °С. На підстанціях без постійного чергування персоналу та у випадках, коли ємність АБ вибрана і розрахована з урахуванням зниження температури, допускається зниження температури до 5 °С.

Для АБ закритого типу експлуатація при температурі вище ніж 20 °С призводить до зменшення терміну служби, тому температуру в приміщенні АБ необхідно підтримувати з урахуванням вимог заводу-виробника. На дверях

приміщення АБ повинні бути написи "Акумуляторна", "Вогнебезпечне", "Курити заборонено". Під час експлуатації АБ необхідно виконувати такі види технічного обслуговування:

- огляди (поточні та інспекторські);
- профілактичний контроль;
- профілактичне відновлення (ремонт).

Періодичність і обсяги технічного обслуговування АБ повинен затверджувати технічний керівник енергооб'єкта. Поточні огляди АБ повинен проводити персонал, який їх обслуговує. В установках з постійним черговим персоналом такий огляд необхідно виконувати один раз на добу, а в установках без постійного чергового персоналу – під час огляду іншого устаткування установки за спеціальним графіком, але не рідше одного разу на 10 днів. Вимірювання напруги та густини електроліту в усіх елементах АБ типів СК та СН а також температури електроліту в контрольних елементах необхідно виконувати не рідше ніж один раз на місяць, в тому числі під час інспекторських оглядів. Вимірювання напруги та густини електроліту в усіх елементах АБ закритого типу необхідно виконувати один раз на рік. Якщо напруга на окремих елементах АБ відхиляється на величину більшу допустимої, їх необхідно перевіряти щомісяця, а за відхилення напруги та густини електроліту на величину більшу від допустимого значення, їх необхідно замінити. Контроль густини електроліту на контрольних елементах необхідно виконувати щомісяця. Обслуговування акумуляторних установок на електростанціях і підстанціях повинно бути покладене на акумуляторника або спеціально навченого електромонтера. На кожній акумуляторній установці повинен бути журнал для запису результатів оглядів і профілактичного контролю, параметрів режиму роботи АБ та обсягів проведених робіт.

Технічне обслуговування щитів постійного струму необхідно проводити один раз на 6-8 років, включаючи ревізію контактних з'єднань, перевірку перерізу з'єднувальних перемичок і збірних шинок. Технічне обслуговування автоматичних вимикачів щитів постійного струму необхідно проводити один раз

на 6 років. Персонал, який обслуговує акумуляторну установку, повинен бути забезпечений [30-55]:

- приладами для контролю напруги окремих елементів АБ, густини і температури електроліту;
- спеціальним одягом і спеціальним інвентарем відповідно до типової інструкції.

Ремонт АБ типів СК необхідно проводити у разі необхідності. Капітальний ремонт із заміною електродів необхідно проводити, як правило, через 15-20 років експлуатації. Ремонт АБ виконують після зниження її фактичної ємності до 70 %. Акумуляторні батареї інших типів повинні експлуатуватися на підставі інструкцій, які розробляють відповідно до вимог заводів-виробників. Установлювати кислотні та лужні АБ в одному приміщенні заборонено.

Контрольні питання до розділу 1

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 2 Свинцево-кислотні акумуляторні батареї

2.1 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 розмежовують сеператорами у вигляді

листів або загортають у матеріал з волокнами скловолокна, 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»).

У гель-свинцевих акумуляторах застосовують гелеподібний електроліт.

Під час розряду акумулятора в результаті реакції відбувається вихід води, а на пластинах обох типів утворюється сірчаноокислий свинець. Через розбавлення водою розчину сірчаної кислоти падає її концентрація і різниця потенціалів між виводами. Оскільки сірчаноокислий свинець володіє низькою питомою провідністю – зростає внутрішній опір акумулятора [32-65].

Стартерні автомобільні акумулятори використовують для швидкої подачі струму для того щоб запустити двигун і для живлення іншого електрообладнання, а акумулятор глибокого заряду-розряду забезпечує постійну подачу струму на протязі тривалого періоду часу. Стартерні автомобільні акумулятори розроблено для запуску автомобільних двигунів і не призначені для глибокого розряду. Вони мають велике число тонких пластин за для максимальної площі поверхні і, отже, максимального вихідного струму, тому можуть бути легко пошкоджені при глибокому розряді. Акумулятори глибокого заряду-розряду використовуються в найрізноманітніших засобах пересування: поїздах, човнах, автотранспортувачах, гольф-карах, електричних транспортних засобах і спеціально розроблені для глибокого розряду-заряду, і тому набагато менш сприйнятливі до деградації. Напруга у акумуляторах глибокого заряду-розряду від 2 до 48 вольт.

Акумулятор складається з позитивного і негативного електродів, розчину сірчаної кислоти (27...39%-вий розчин) і сепаратора, що розділяє позитивні і негативні пластини [32-65].

Номінальна напруга кожного акумулятора складає 2В. Звичайно акумулятори з'єднують у батареї, що складаються з трьох (загальна напруга батареї 6В), шести (загальна напруга батареї 12В) або дванадцяти акумуляторів

(загальна напруга батареї 24В).

Застосовуються два типи електродів: поверхневі і пастовані. Поверхневий електрод складається зі свинцевої пластини, на поверхні якої електрохімічним способом формується шар активної маси. Пастовані електроди підрозділяються на гратчасті (намазні), коробчаті і панцирні [32-65].

З гратчастих (намазних) електродах активна маса утримується в гратці зі свинцево-сурм'яного сплаву товщиною 1...4 мм. У коробчатих пластинах гратки активною масою закриваються з двох сторін перфорованими свинцевими аркушами.

Панцирні пластини складаються зі свинцево-сурм'яних штирів, що містяться усередині пластмасових перфорованих трубок, заповнених активованою масою. Для негативних електродів використовуються намазні і коробчаті пластини, для позитивних – поверхневі, намазні і панцирні. Як сепаратори застосовують мікропористі пластини з вулканізованого каучуку (міпор), полівінілхлориду (міпласт) і скловолокна.

Батареї акумуляторів поміщають у моноблок з ебоніту, термопласту, поліпропілену, полістиролу, поліетилену, асфальтопекової композиції, кераміки або скла.

Акумулятори і батареї мають умовне буквено-цифрове позначення. Перша цифра (для вітчизняних акумуляторів) вказує число послідовно з'єднаних акумуляторів. Оскільки номінальна напруга свинцевого акумулятора дорівнює двом вольтам, то номінальна напруга акумуляторної батареї дорівнює числу послідовно з'єднаних елементів, помноженому на два.

Для деяких акумуляторів указуються кліматичне виконання і розміщення. Наприклад, стартерна батарея із шести акумуляторів ємністю 55 А·год у моноблоці з ебоніту і з сепаратором зі скловолокна має умовну позначку: батарея 6СТ-55ЭС, ГОСТ 959.0-79.

По конструктивних ознаках свинцеві стартерні акумуляторні батареї підрозділяються на наступні типи:

- батарея звичайної конструкції – у моноблоці з окремими кришками на

кожен акумулятор і межелементними з'єднаннями над кришками;

- батареї із загальною кришкою – у моноблоці з загальною кришкою і межелементними з'єднаннями під кришкою;

- батарея що необслуговується чи малообслуговується – у моноблоці з загальною кришкою, залиті електролітом і цілком заряджені.

Різні типи свинцевих стартерних акумуляторних батарей мають свої конструктивні особливості, але в їхньому пристрої є багато загального. Свинцева стартерна акумуляторна батарея складається з 3 чи 6 послідовно з'єднаних акумуляторів, поміщених у єдиний бак – моноблок. Моноблок розділений непроникиними перегородками на секції по числу акумуляторів.

У кожній секції моноблока розміщені позитивні і негативні пластини акумулятора, розділені сепараторами і зібрані в блоки пластин за допомогою мостів і борнов. Зверху пластин і сепараторів установлюється запобіжний щиток.

Акумулятори після установки блоків пластин закриваються окремими чи кришками моноблок закривається загальною кришкою.

З'єднання акумуляторів у батарею здійснюється за допомогою зовнішніх чи внутрішніх перемичок – межелементних з'єднань.

Моноблоки

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

Для батарей, призначених для експлуатації при низьких температурах, для розігріву електроліту застосовуються гнучкі електронагрівники з угляграфітного шнура у фторопластовій чи оболонці плівкового типу на основі друкованої

плати, убудовані в моноблок.

У нижній частині сучасних пластмасових моноблоків виконуються спеціальні виступи з невеликими поглибленнями для кріплення батарей. Моноблоки батарей, що мають велику масу, забезпечуються фасонними припливами, у які вставляються ручки для переносу батареї, виготовлені з еталу полімерних матеріалів [32-65].

Кришки і пробки

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

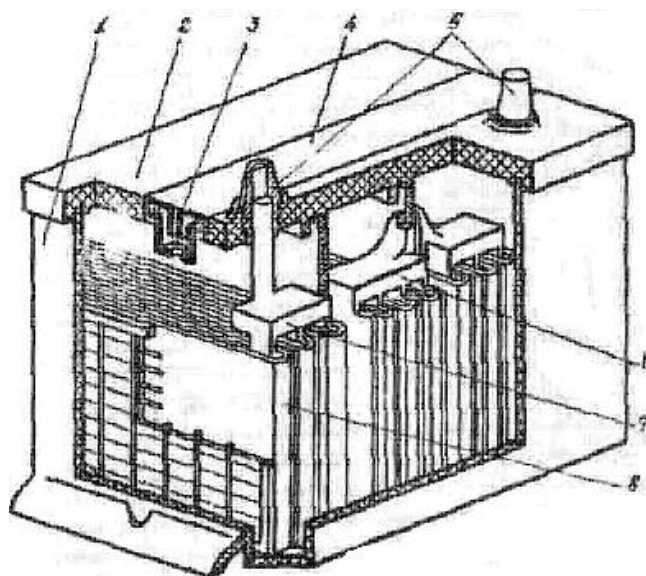


Рисунок 2.1 – Свинцева стартерная малообслужуванана акумуляторна батарея: 1 – моноблок; 2 – загальна кришка; 3 – пробка; 4 – планка; 5 – полюсні виводи; 6 – напівблок позитивних пластин; 7 – напівблок негативних пластин; 8 – сепаратор-конверт.

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.

Пробка має внизу різьбову частину і вентиляційний отвір для виходу газів під час експлуатації. У пробку уставляється відбивач у виді диска з отворами на пробці з пелюстами, що служать відбивачами для запобігання виливання

електроліту. Для ущільнення пробки в різьбовому отворі кринки застосовується гумава шайба спеціальні герметизуючі припливи на бортику пробки.

Пластини і напівблоки пластин

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

Струмовідвід служить для утримання активної маси і рівномірного розподілу струму по всій її площі. До струмовідводів пред'являються наступні вимоги: корозійна стійкість сплаву для струмовідводів, міцність, мінімальна маса струмовідводу при максимальному вільному обсязі для нанесення активної маси і здатність забезпечувати гарний контакт з активною масою. Струмовідвід складається з рамки, жилок, вушка, що служить для рівнобіжного з'єднання пластин однієї полярності в напівблок, і двох ніжок, якими пластина спирається на призми моноблока. Ніжки в позитивних і негативних пластин розташовані таким чином, щоб кожен напівблок пластин спирався на дві відповідні призми моноблока і виключалося коротке замикання різнойменних пластин шламом. У струмовідводу пластини, поміщеної в сепаратор-конверт, ніжки відсутні. Струмовідводи для звичайного типу батарей виготовляються зі свинцево-сурмянистого сплаву, що містить 3...5% сурми для підвищення міцності і поліпшення ливарних властивостей і 0,12...0,20% миш'яку для підвищення корозійної стійкості струмовідводів [32-65].

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", струмовідводу негативних пластин виготовляють зі свинцево-кальцієво-оловянистого сплаву, а струмовідводи позитивних пластин – зі сплаву свинцю, легованого сурмою (1,25%) і кадмію (1,5%).

На струмовідводи наноситься паста, що представляє собою масу зі свинцевого порошку, замішаного на водяному розчині сірчаної кислоти. У пасту негативних пластин додаються розширники ГКД, БНФ BaSO_4 для запобігання

усадки (зменшення пористості) губчатого свинцю при експлуатації батарей і інгібітори для зменшення окислювання свинцю (α -оксинафтойная чи борна кислота). Після нанесення пасти, пресовки і сушіння пластини піддають формуванню, тобто утворенню активних мас. Для цього пластини поміщають в електроліт щільність $1,07 \dots 1,15 \text{ г/см}^3$ і заряджають. Закінчення формування визначається по зовнішньому вигляді пластин, сталості напруги і рясному газоутворенню.

Формування пластин для звичайних батарей проводиться у формиривочних баках. Для досягнення сухозарядженности, тобто здатності приведення батарей у дію шляхом 20-хвилинного просочення електролізом, після формування пластини повинні бути піддані інтенсивному сушінню.

Однорідні пластини шляхом розплавлювання вушок пластин і додавання свинцево-сурм'янистого 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 встановлюється перфорований запобіжний щиток для захисту крайок сепараторів від ушкоджень при вимірах температури, щільності і рівня електроліту [32-65].

Сепаратори

Мікропористі сепаратори, розташовані між різнойменними 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 звичайних батареях з окремими кришками на акумулятори зовнішні перемички зі свинцево-сурм'янистого сплаву зварюються з вивідними борнами і свинцевими втулками, запресованими в кришки, що забезпечує гарну електропровідність і герметичність акумуляторів.'

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 полюсні 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 мипора.

Визначення номінальної ємності при розряді батареї є однією з контрольних

перевірок її стану в процесі експлуатації і можливості порівняння батарей.

Номинальна 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 $+25^{\circ}\text{C}$ и 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 формул:

$$C_{20} = \frac{C_t}{1 + 0.01(t_e - 25)} \quad (2.1)$$

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.

Резервна ємність показує можливість батареї забезпечити електропостачання споживачів при виході з ладу генератора.

Стартерні характеристики батареї оцінюються величиною тривалості безупинного розряду цілком зарядженої батареї постійним струмом $I_p = 3C_{20}$ при температурі -18°C до кінцевої напруги 3,0 В (для батареї з номінальною напругою 6 В) і 6,0 В (з напругою 12 В). Отримана тривалість розряду батареї за даних умов порівнюється з мінімальною тривалістю розряду батарей, що складає 3,0 хв. Напруга на висновках батареї на 5...7 секунд після розжарення розряду для батарей з окремими кришками повинне бути не нижче 4,2 В чи 8,4 В (для номінальної напруги 6 В чи 12 В), а для батарей із загальною кришкою і що необслуговуються – відповідно 4,5 В чи 9,0 В на 30-й секунд розряду.

Як додатковий показник, що оцінює стартерні властивості батарей, що необслуговуються, застосовується розряд батареї «струмом холодного прокручування» – максимальною силою струму стартерного розряду, при якій на 30-й секунді розряду при температурі -18 C напруга на висновках складе не менш $3,6\text{ В}$ чи $7,2\text{ В}$ (відповідно для номінальної напруги 6 В чи 12 В).

Показник «струм холодного прокручування» дозволяє орієнтовно підібрати акумуляторну батарею для заданого типу стартера: струм холодного прокручування батареї повинний бути трохи більше струму, споживаного стартером при пуску холодного двигуна [32-65].

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

$$S = \frac{C_{20\text{поч}} - C_{20\text{кін}}}{C_{20\text{поч}}} * 100, \quad (2.2)$$

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

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.

Термін служби акумуляторної батареї визначається як тривалість експлуатації батареї (пробіг чи автомобіля моточаси роботи двигуна) до моменту виникнення граничного стану – зниження ємності нижче 40%, від номінальної чи зниження тривалості стартерного розряду при температурі $+25^{\circ}\text{C}$ менш 1,5 хв.

Мінімальний термін служби батарей (з окремими кришками і загальною кришкою) в експлуатації повинний складати 12 місяців при пробігу 150 тис. км чи 24 місяця при 90 тис. км чи пробігу наробітку 3000 мотогодин. Мінімальний термін служби батарей, що необслуговуються повинний складати 36 місяців при пробігу не більш 100 тис. км.

2.2 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 сірчаноокислого 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. 2.3) і питому потужність (до 100...150 $Вт/кг$) і відносно недорогі. До основних їхніх недоліків варто віднести низьку питому енергію і відносно малий ресурс.

При заряді акумулятора в міру нагрівання електроліту внутрішній опір падає, чим пояснюється стрибок напруги кривої 2 на рис. 2.3 у перший момент часу. Далі напруга на акумуляторі росте тому що ємність збільшується. При розряді хімічні реакції в акумуляторі якийсь час протікають повільніше тому що електроліт ще не прогрівся до робочої температури, чим і пояснюється деякий спад напруги на початку процесу розряду і подальша його стабілізація (крива 1 рис. 2.3); далі напруга на акумуляторі по мірі розряду падає оскільки знижується його ємність. Простір між кривою заряду і розряду показує втрати енергії при циклі заряд-розряд.

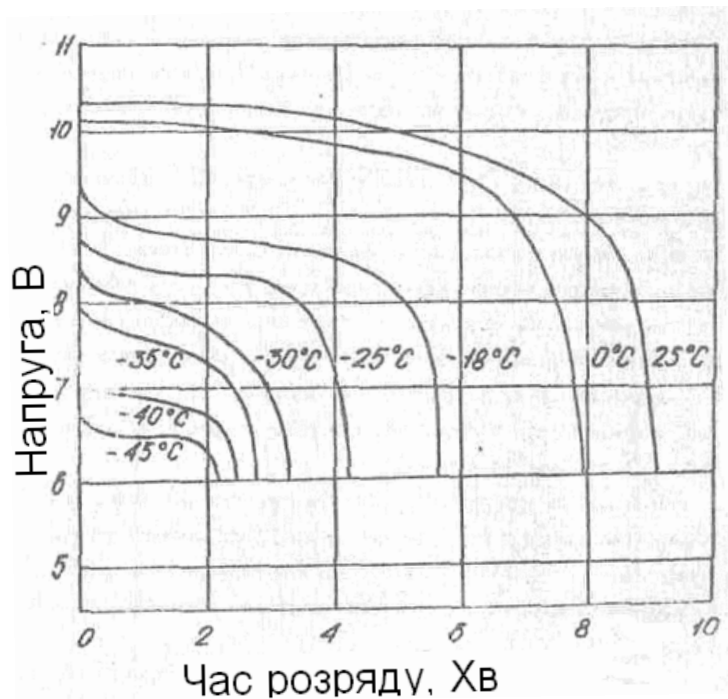


Рисунок 2.3 – Криві розряду (1) і заряду (2) свинцевого акумулятора

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 розімкнутого 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.2.4).



Рисунок 2.4 – Залежність напруги розімкнутого кола свинцево-кислотного

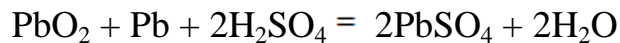
акумулятора від рівня зарядженості [19]

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 будь-якому джерелі енергії відбувається перетворення енергії з одного виду на інший.

Свинцевий акумулятор належить до хімічних джерел струму, які перетворюють енергію, що виділяється під час хімічних реакцій, на електричну

У свинцевому акумуляторі процеси протікають зворотно. Активні речовини, витрачені в процесі реакції, можуть відновлятися під час пропускання 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° С 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 сульфитації і закінчується через 3 години після установлення 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.

Цикл проводиться силою струму $0,1C_{20}$ А до напруги 2,4 В, на кожному акумуляторі, після – повний заряд батареї струмом $0,05C_{20}$ А , потім – розряд струмом $0,05C_{20}$ А до напруги 1,75 В.

Підбір батарей в групи для заряджання і розрахунок кількості в залежності від характеристики зарядного пристрою.

Кількість послідовно з'єднаних батарей підбирають в групи в залежності від мах. вихідної напруги зарядного пристрою, щоб на кожний акумулятор припало не менше 2,7 В.

Кількість груп батарей, для одночасного заряджання, приймається в залежності від величини струму, який може забезпечити зарядний агрегат та величина струму заряду окремих груп [32-65].

Приклад: Потрібно зарядити АБ 5СТ – 60А від зарядного агрегата ВСА – 120 – 60.

1. Розрахунок кількості батарей, з'єднаних послідовно в одну групу, із розрахунку напруги 2,7 В на один акумулятор:

$$N_6 = \frac{U_{\text{аг}}}{2,7 \cdot n} = \frac{120}{2,7 \cdot 6} = 7,41 \approx 6 \text{ батарей}$$

2. Розрахунок кількості груп батарей для підключення до зарядного агрегату. Кількість груп повинна бути такою, щоб сумарна сила зарядного струму в мережі всіх груп, включених АкБ , не перевищувала номінальну силу струму зарядного агрегату.

$$N_{\text{гр.б.}} = \frac{I_{\text{агр}}}{I_{\text{з.б}}} = \frac{60}{6} = 10 \text{ груп батарей}$$

До групи слід вводити максимальну кількість батарей, , щоб зменшити втрати енергії на реостатах. Заряджання виконується двома ступенями, по першому з яких $I_{з.б.} = 0,1 C_{20}$, А друга ступінь – $I_{з.б.} = 0,05C_{20}$. І після досягнення напруги 2,7 В, то заряджання продовжують ще 1 - 2 години, для 100% заряджання нової батареї [32-65].

Типи зарядних пристроїв, що застосовуються в експлуатації

Для заряджання АБ в стаціонарних умовах застосовується на сьогодні багато зарядних і пускозарядних пристроїв і агрегатів. Більш ранніх випусків – це селенові випрямлячі типу ВСА -5М, ВСА – 120-60, ВСА – 300- 90 та інші. Із тих, що пропонуються сьогодні – це автоматичні пристрої для заряду АкБ – МАТІС – 12В, МАТІС – 113, 116, 119 (переносні) від мережі змінного струму 220 В і випрямленою напругою постійного струму – 12 В, потужністю 30, 80 і 115 Вт відповідно. Зарядні пристрої групи SMART – 119. 1115. 1222. 1230, розроблених спеціально для обслуговування стандартних свинцевих АкБ і Свинцевих з гелієвим електролітом (необслуговуємі)., має вибір ручної і автоматичної зарядки, повний захисті відсутність контролю заряду, захист від перевантажень мережі, неправильної полярності підключення і короткого замикання вихідної мережі. Потужність – 115, 190, 280/480, 380/660 Вт. Відповідно Цифрова станція заряду АкБ і пуску ДВС з мікропроцесорним контролем SMART 3300 DIGITAL STATION – це професіональна система заряду і тестування стандартних свинцевих АБ і свинцевих з гелієвим електролітом необслуговуємих акумуляторів та нікель-кадмієвих.

Густина електроліту вимірюється денсиметром з ціною ділення шкали 0,01 г/см³, або густиноміром з набором поплавків. При вимірюванні густини необхідно враховувати температурну поправку. Допускається відхилення густини електроліту в акумуляторах однієї батареї не більше як на 0,01г/см³.

Ступінь розрідженості батареї визначається по ступені розрідженості акумулятора, який має саму низьку густину електроліту

Зниження густини електроліту на 0,01 г/см³, по відношенню до повністю зарядженого акумулятора, відповідає розряду акумулятора на 6%.

Приклад: Якщо густина електроліту повністю зарядженого акумулятора була $1,27 \text{ г/см}^3$, а при вимірюванні стала $1,23 \text{ г/см}^3$, то акумулятор розряджений на 24%.

Батареї розряджені більше як на 25% взимку і 50% влітку, повинні зніматися з авто і заряджатися.

2.3 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].

Акумуляторні свинцево-кислотні батареї із зарядом в 1 А·год/батарея забезпечують силу струму набагато меншу, ніж у лужних. Свинцево-кислотні акумулятори мають вищу робочу напругу в порівнянні з лужними акумуляторами. Але вони мають нижчі питомі енергетичні характеристики та значно менший ресурс при циклічності до вичерпання запасеної ємності. Ці батареї частіше використовуються для роботи в буферному режимі, при якому вони зберігають працездатність до 10–12 років.

В останні роки виникли нові сфери застосування батарей, наприклад у якості резервних джерел живлення ЕОМ і систем, що накопичують енергію для можливих пікових навантажень [3].

Великий досвід їх застосування в системах безперебійного живлення, телекомунікації, охоронних і сигнальних, а також постійне вдосконалювання самих джерел струму дозволяють розраховувати на стабільність сфери їх використання в найближчі роки.

Для батарей звичайного типу температура електроліту, що заливається в акумулятор, повинна бути не вище 30 С и не нижче 15С, не раніше ніж через 20 хв і не пізніше, ніж через 2 години після заливання необхідно перевірити щільність електроліту. Якщо щільність електроліту понизилася не більше ніж на 0,03 г/см³ щодо щільності при заливанні, то батареї може бути поставлена на експлуатацію. При зниженні щільності на 0,03 г/см³ і більш батарею потрібно поставити на заряд [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 зарядженности батареї. Кінець заряду визначається сталістю напруги і щільності електроліту в плинні 2 годин і характеризується рясним газовиделением 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 дистилированої води до рівня, поки дзеркало електроліту не торкнеться нижнього торця тубуса горловини чи кришки при відсутності тубуса 10...15мм вище запобіжного щитка.

При експлуатації акумуляторних батарей виникають несправності, що чи

знижують електричні характеристики батарей, чи цілком виходять їх з ладу. У більшості випадків несправності є результатом неякісного технічного обслуговування і недотримання правил експлуатації акумуляторних батарей на автомобілях.

Основними зовнішніми несправностями свинцевих акумуляторних батарей є механічні ушкодження (тріщини, відколи) моноблоків і кришок, ушкодження заливальної мастики, оплавлення полюсних висновків, порушення контакту в чи перемичках у полюсних висновках і інші [32-65].

До внутрішніх несправностей відносяться наступні: руйнування пластин (корозія решіток позитивних шарам, опливання активної маси, короблення пластини); коротке замикання позитивних і негативних пластин (проростання сепараторів, нарости губчатого свинцю на крайках пластин, надмірне нагромадження шламу на дні моноблока); незворотня сульфатація пластин; підвищений саморозряд.

Основною причиною відмовлення в роботі свинцевих акумуляторних батарей є корозія струмовідводів позитивних пластин. При перезаряді батареї кисень, що утвориться при електролізі води проникає через шар діоксида свинцю до поверхні струмовідводу й окисляє його. Крім того, при підвищених температурах відбувається окислювання струмовідводу киснем, що входить до складу діоксида свинцю. Окислений струмовідвід стає тендітним і легко руйнується особливо в умовах вібрації і тряски, викликаючи руйнування пластин. Зі збільшенням температури, сили струму і тривалості перезаряду швидкість корозії струмовідводів збільшується.

Опливання активної маси позитивних пластин тобто відділення від пластин дрібних кристалів і зерен діоксида свинцю, є однією з причин передчасного виходу з ладу АБ. При опливанні зменшується кількість активної маси, що участвують у реакціях, унаслідок цього знижується ємність акумуляторів. Одночасно збільшується небезпека замикання пластин різної полярності через шлам. Що скапливається на дні секцій моноблока.

Необоротна сульфатація пластин виникає внаслідок неповноти

формування пластин, великого саморозряду під дією різних домішок, неприпустимого зниження рівня електроліту, систематичних чи недозарядів тривалого збереження батареї в незарядженому стані. При необоротній сульфатації на пластинах утвориться крупнокристаллический сульфат свинцю, що не розпадається при заряді, що приводить до зниження ємності, руйнуванню активної маси і коробленню пластин [32-65].

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.

Акумуляторні батареї після доставки до споживача до приведення в робочий стан можуть знаходитися на збереженні. Свинцеві стартерные акумуляторні батареї звичайного типу поставляються споживачу в сухому виді - не залиті електролітом. Акумуляторні батареї, що необслуговуються, поставляються залиті електролітом і цілком заряджені.

Нові не залиті електролітом акумуляторні батареї рекомендується зберігати в неопалюваних сухих приміщеннях при температура до -50°C . При постановці на хropіння пробки на акумуляторних батареях повинні бути щільно загвинчені, герметизуючі деталі (ущільнювальні диски, плівки, виступи на пробках і ін.) должки бати на місці.

Акумуляторні батареї при тривалому збереженні в сухому виді повинні періодично оглядатися з метою визначення надійності герметизації пробок і кришок і стану мастики. З появою тріщин у мастиці необхідно усунути їх

шляхом оплавлення мастики слабким полум'ям газового чи пальника електричним паяльником,

При збереженні батареї встановлюється а один ярус кришками нагору, повинні бути забезпечений вільний доступ до батарей і захист їхній від улучення прямих сонячних променів.

Максимальний термін збереження не залитих електролітом акумуляторних батарей повинний складати 3 роки, для батарей 6СТ-190, 6СТ-190А -і 5 років.

Нові акумуляторні батареї, що необслуговуються, (залиті електролітом і цілком заряджені) повинні зберігатися в неопалюваних сухих приміщеннях при температурі не нижче -і 50 С. Перед постановкою на, збереження необхідно перевірити надійність установки пробок і плівок. Термін збереження акумуляторних батарей, що необслуговуються, без подзаряда не повинний перевищувати 12 місяців. Після бездіяльності протягом 12 місяців акумуляторну батарею, що необслуговується, варто підзарядити струмом, рівним 0,05С20, А при температурі електроліту в межах 15...45°З до сталості напруги на висновках батареї до щільності електроліту протягом 3 годин. Після подзаряди акумуляторну батарею, що необслуговується, можна установити на чи автомобіль залишити на наступний період збереження. Максимальний термін збереження акумуляторних батарей, що необслуговуються, із проміжним подзарядом складає 2 роки [32-65].

На збереження можуть установлюватися батареї, приведені в дію і не колишні в експлуатації, а також акумуляторні батареї, зняті з експлуатації на автомобілях. У цих випадках рекомендується зберігати акумуляторні батареї з електролітом Цілком зарядженими при температурі не вище 0°С для зменшення швидкості корозії ґрат позитивних пластин батарей.

Акумуляторні батареї, приведені в дію, але не колишні в чи експлуатації зняті з автомобілів після короткочасної експлуатації встановлюються на збереження тільки після заряду і доведення щільності електроліту до нормованого значення, що відповідає даній кліматичній зоні. Рекомендується знизити щільність електроліту, прийняту для зимової експлуатації. с 1,30 до 1,28

г/см³ у батареях; находящихся на збереженні, для зменшення руйнування пластин,

У процесі збереження акумуляторних батарей при температурі 0°C и нижче щомісяця контролюється щільність електроліту. При зниженні щільності електроліту на 0,04 г/см³і більш щодо первісної виробляється подзаряд батарей. При збереженні акумуляторних батарей, залитих електролітом, у приміщеннях з температурою вище 0°C виникає необхідність у більш частому контролі щільності електроліту і підзарядці батарей.

Максимальний термін збереження залитих електролітом акумуляторних батарей при температурі не вище 0°C складає 1,5 року, б при кімнатній температурі і вище -і 9 місяців [32-65].

Контрольні питання до розділу 2

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 3 Нікель-кадмієві акумуляторні батареї

3.1 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].

На відміну від нікель-кадмієвого акумулятора, в якому негативним електродом є кадмієвий електрод, нікель-метал-гідридні акумулятори мають вищі енергетичні характеристики, однак мають вузький 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.

Сучасні (ламельні) промислові нікель-кадмієві батареї можуть служити до 20-25 років. Нікель-кадмієві акумулятори (Ni-Cd) – єдиний тип акумуляторів, який може зберігатися розрядженим – на відміну від нікель-метал-гідридних акумуляторів (Ni-MH), які потрібно зберігати повністю зарядженими, і літій-йонних акумуляторів (Li-ion), які необхідно зберігати при 40%-ому заряді від ємності акумулятора [38-75].

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

3.2 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.3.1. Ці параметри забезпечують різну чутливість і мають різні обмеження при використанні.

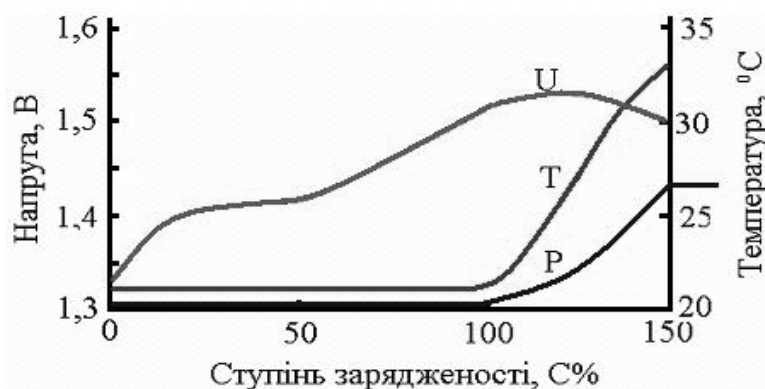


Рисунок 3.1 – Зміна характеристик герметичного нікель-кадмієвого акумулятора при зарядженні [19]

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 ($U_{кін}$) 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].

У цей час для контролю ходу швидкого заряду частіше використовують інший критерій: переривання зарядження роблять після того, як напруга акумулятора зменшиться на ΔU після досягнення максимуму. Це забезпечує потрібний рівень перезаряду акумуляторів.

Такий контроль рекомендується для швидкого зарядження (впродовж 1 години) циліндричних лужних рулонних акумуляторів, якщо виготовлювач дозволяє такий заряд для конкретного типу акумуляторів. У літературі він називається детекцією $-\Delta U$. Величина $-\Delta U$ для акумуляторів різних виробників може становити від 5–10 до 10–20 мВ. Для контролю заряду частіше пропонується використовувати величину 10 мВ при температурі зарядження від

0 до 30 °С. При цьому на початку заряджання (упродовж 5–10 хв) рекомендується не проводити вимірювання напруги джерела струму, щоб уникнути спрацьовування системи контролю через можливий стрибок напруги (і подальшого його невеликого спаду) після тривалого зберігання.

Іншим параметром, що застосовується при контролі зарядження сучасних герметичних лужних акумуляторів, є температура. Контроль температури найбільше потрібний при зарядженні нікель-металогідридних акумуляторів. Температурний датчик установлюється не на кожному акумуляторі, а на одному з них у батареї. Зрозуміло, що вплив конструктивних особливостей батареї й реалізованих у ній умов теплообміну роблять контроль зарядження за абсолютною величиною температури T досить проблематичним, тому що непросто однозначно визначити величину цього параметра. Фахівці компанії GP, наприклад, детально досліджували процес зарядження батареї ємністю 2,5 А·ч струмом 0,5 А при температурі навколишнього середовища (T) від 15 до 45 °С. Вивчалось відключення при температурі батареї ($T_{\text{бат}}$), що дорівнює 55 і 60 °С. Було показано, що якщо температура навколишнього середовища вище 35 °С, то при $T_{\text{бат}} = 55$ °С має місце істотний недозаряд. При $T_{\text{бат}} = 60$ °С недозаряд трохи зменшується. Збільшувати ще більше значення контрольованого параметра ($T_{\text{бат}} > 60$ °С) не можна без ризику збільшення небезпеки відмови акумулятора.

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].

3.3 Експлуатаційні характеристики нікель-кадмієвих 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.

Конструкція корпусів Ni-MH акумуляторів і NiCd акумуляторів однакова, тому тиск, що розвивається в акумуляторах обох систем при перезаряді і перерозряді, є однаковим. Ідентичними в обох видах акумуляторів є також конструкція позитивних електродів та склад електроліту. Але завдяки підвищеній закладці активних мас окисно-нікелевого електрода ємність Ni-MH акумулятора значно зросла.

Перевагою перед NiCd акумуляторами є збільшення питомих енергетичних характеристик.

Хоча ефекти, пов'язані з перезарядом окисно-нікелевого електрода, залишаються, проте у Ni-MH акумуляторів відсутній «ефект пам'яті», властивий Ni-Cd акумуляторам через утворення нікелату в негативному кадмієвому електроді.

Зниження розрядної напруги, що спостерігається при частих і тривалих перезарядках так само, як і в Ni-Cd акумуляторів, може бути усунуте при періодичному здійсненні декількох розрядів до одного вольту. Такі профілактичні заходи достатньо проводити один раз на місяць.

Недоліки Ni-MH акумуляторів перед NiCd акумуляторами

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

- ефективно працюють у вузькому 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.

Деградація нікель-метал-гідридних акумуляторів визначається, насамперед, зменшенням при циклуванні сорбуючої здатності негативного електрода. У циклі заряду-розряду відбувається зміна об'єму кристалічних решіток сплаву, що призводить до утворення тріщин і подальшої корозії при взаємодії з електролітом. Утворення продуктів корозії відбувається зі споживанням кисню і водню, у результаті чого знижується загальна кількість електроліту і збільшується внутрішній опір акумулятора.

При зберіганні у розрядженому стані нікель-метал-гідридні акумулятори не втрачають працездатності протягом одного року.

Відмова від кадмію означає більш екологічно чисте виробництво, внаслідок чого легше вирішується і проблема утилізації використаних акумуляторів.

NiMH акумулятори з низьким саморозрядом (LSD NiMH)

В листопаді 2005 року з'явився принципово новий тип нікель-метал гідридних акумуляторів, який отримав назву LSD Ni-MH (англ. Low Self-Discharge Nickel-Metal Hydride Battery) – нікель-метал гідридних акумулятори з низьким рівнем саморозряду. Цей тип акумуляторів представила компанія Sanyo під торговою маркою Eneloop. Якщо традиційні NiMH акумулятори втрачають до 10% ємності заряду за першу добу і 0,5% після цього, то LSD Ni-MH втрачають від 0,04% до 0,1% в день.

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 3

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 4 Літій-іонні акумуляторні батареї

4.1 Особливості побудови літій-іонних акумуляторних батарей

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

Спроби розробити літєві електричні батареї, що перезаряджаються, проводилися в 70-х р. ХХ ст., але були невдалими через неможливість забезпечення потрібного рівня безпеки при їх експлуатації оскільки літій занадто активний і настільки бурхливо реагує з водою, що може спалахнути. Було встановлено, що в ході циклів заряду-розряду електричної батареї з металевим літєвим електродом може виникнути коротке замикання всередині акумуляторної батареї. При цьому температура всередині акумулятора може досягти температури плавлення літію. У результаті бурхливої хімічної взаємодії літію з електролітом відбувається вибух [48-95].

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 °С, так і при 40 °С [48-95].

Ресурс літєвих акумуляторів – 500–1000 циклів.

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

Наведені показники варто розглядати як деякі номінальні орієнтири. Для кожного конкретного акумулятора, наприклад, розрядна напруга залежить від струму розряду, рівня розрядженості, температури; ресурс залежить від режимів (струмів) розряду й заряду, температури, глибини розряду; діапазон робочих температур – від рівня виробленого ресурсу та припустимих робочих напруг.

Літій-іонний акумулятор (скорочено Li-ion) – один з двох основних типів літєвих електричних акумуляторів з категорії вторинних електричних батарей, який відрізняється з літій-полімерним акумулятором лише типом електроліту, що використовується при їх виготовленні. Широко розповсюджений в побутовій електроніці.

Назву літій-іонні акумулятори одержали через те, що електричний струм в зовнішньому колі з'являється через перенос літєвих іонів від анода до катода на

основі різних сполук.

Хімічний склад, експлуатаційні характеристики, вартість та безпечність акумуляторів відрізняються залежно від типу літій-іонних акумуляторів. Найбільш поширеним у переносній електроніці є акумулятори з катодом на оксиді кобальту (LiCoO_2), що мають високу енергетичну густину, але мають недолік з точки зору безпеки експлуатації, особливо при пошкодженні. Літій-ферум-фосфатні (відомі як літій-залізо-фосфатні, LiFePO_4), літій-манган-оксидні (LiMn_2O_4 , Li_2MnO_3 або літій-манганові акумулятори LMO) та літій-нікель-манган-кобальт-оксидні (LiNiMnCoO_2 чи NMC) акумулятори, що теж названі за типом катоду, пропонують нижчі рівні енергетичної густини, але мають довший життєвий цикл та безпечніші з хімічної точки зору. Такі акумулятори широко застосовуються в електроінструментах, медичному обладнанні та ін. NMC, зокрема, є лідером за використанням в автомобільній промисловості. Літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні (LiNiCoAlO_2 або NCA), що теж названий за катодом, та літій-титанатові ($\text{Li}_4\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ чи LTO) акумулятори (назва останнього за анодом), спеціально розроблені для певних нішових ролей. Нові літій-сульфурні акумулятори обіцяють найвище відношення експлуатаційних характеристик до ваги [48-95].

Подібна кваліфікація за назвами є не науковою, а радше маркетинговою, оскільки проводяться роботи з розробки акумуляторів з катодом LiFePO_4 та анодом $\text{Li}_4\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, що у цій системі не матиме простої назви.

До недоліків Li-іон акумуляторів варто віднести чутливість до перезарядження і сильного розряду, через це вони повинні мати обмежувачі заряду й розряду.

Принцип роботи Li-іон акумуляторів заснований на переміщенні позитивно заряджених іонів літію Li^+ між позитивними й негативними електродами в процесі розрядки й зарядки. Металевий літій у цих процесах участі не бере, тому не виникає будь-яких проблем з відновленням електродів, що забезпечує стабільність і безпеку при використанні батареї.

Наявність негативного електрода, який приймає і віддає іони, є загальним

для всіх систем, але існує широкий вибір матеріалів, придатних для реалізації позитивного електрода й здатних забезпечувати різницю потенціалів між електродами до 3 В.

Для нормальної роботи будь-якої електрохімічної батареї необхідно як мінімум три компоненти: два електроди й електроліт, що забезпечує перенос іонів. У малогабаритних батареях електроліт може бути твердим, рідким і желеподібним. Рідкі електроліти застосовуються, як правило, у клеєних циліндричних батареях, але через високу небезпеку займання вони не знайшли застосування в інших системах. Для розробки твердих електролітів для літієвих акумуляторів, що мають можливість перезарядження, пішло два десятиліття напружених досліджень. На їх основі стало можливим створення тонких і плоских батарей, але з невеликим діапазоном робочих температур та малою потужністю.

Nissan Leaf з літій-іонним акумулятором

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 клеммами);
- в чохлах (м'які, плоскі тіла, такі, як ті, які використовуються в мобільних телефонах);
- призматичні (напівжорсткий пластиковий корпус з великими гвинтовими клеммами), наприклад, у габариті 6Т для бронетехніки.

Конструктивно Li-ion 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.

Призматичні акумулятори виготовляються шляхом складання прямокутних

пластин одна на одну. Вони забезпечують щільніше упакування в акумуляторній батареї, але, на відміну від циліндричних акумуляторів, складніше витримують стискуючі зусилля на електроди. У деяких призматичних акумуляторах застосовується рулонне складання пакета електродів, що скручується в еліптичну спіраль.

Деякі конструктивні заходи звичайно застосовують і для запобігання швидкому розігріву і забезпечення безпечної роботи Li-ion акумуляторів. Під кришкою акумулятора є пристрій, що реагує на позитивний температурний коефіцієнт збільшення опору, і, який розриває електричний зв'язок між катодом і позитивною клемою при підвищенні тиску газів всередині акумулятора вище допустимої норми. Для підвищення рівня безпеки експлуатації Li-ion акумуляторів у складі батареї обов'язково застосовується також і зовнішній електронний захист, мета якого не допустити перезарядження й перерозрядження, короткого замикання й надмірного розігрівання.

Конструкція Li-ion та інших літєвих акумуляторів, як і конструкція всіх первинних батарей з літєвим анодом, відрізняється абсолютною герметичністю. Вимога абсолютної герметичності визначається як неприпустимістю витікання рідкого електроліту (негативно діючого на прилади) і недопустимість потрапляння в акумулятор кисню і вологи з навколишнього середовища, оскільки вони реагують із матеріалами електродів й електроліту, повністю виводячи акумулятор із ладу [48-95].

Li-ion акумуляторні батареї комерційного призначення мають найбільш досконалий захист, порівняно з усіма типами батарей. Як правило, у схемі захисту Li-ion батарей використовується ключ на польовому транзисторі, який при досягненні на елементі батареї напруги 4,30 В відкривається й тим самим перериває процес заряду. Крім того, наявний термозапобіжник, який при нагріванні батареї до 90°C від'єднує коло її навантаження, забезпечуючи її термозахист.

Деякі акумулятори мають вимикач, який спрацьовує при досягненні граничного рівня тиску всередині корпуса, рівного 1034 кПа (10,5 кг/м²), і

розриває ланцюг навантаження. Є й схема захисту від глибокого розряду, що стежить за напругою акумуляторної батареї й розриває ланцюг навантаження, якщо напруга на елемент знизиться до рівня 2,5 В.

Внутрішній опір схеми захисту акумуляторної батареї мобільного телефону в увімкненому стані дорівнює 0,05- 0,1 Ом. Конструктивно вона складається з двох ключів, з'єднаних послідовно. Один з них спрацьовує при досягненні верхнього, а інший – нижнього порогів напруги на батареї. Загальний опір цих ключів фактично створює подвоєння її внутрішнього опору, особливо, якщо батарея складається лише з одного акумулятора.

У деяких Li-ion батареях, в яких використовують марганець, що мають 1-2 елементи; схема захисту не застосовується. Замість цього в них встановлено лише один запобіжник. І такі батареї є безпечними завдяки їх невеликим габаритам та ємності. Крім того, марганець досить «терплячий» до порушень правил експлуатації Li-ion батареї. Відсутність схеми захисту зменшує вартість Li-ion батареї, але породжує нові проблеми.

При використанні недорогих зарядних пристроїв, призначених для підзарядки від мережі або від бортової мережі автомобіля, можна бути впевненим, що за наявності в батареї схеми захисту, вона відключить її при досягненні напруги кінця заряду. Якщо схему захисту в акумуляторі не передбачено, станеться перезаряд батареї і, як наслідок, її незворотний вихід з ладу. Цей процес супроводжується підвищенням нагріванням і роздуттям корпусу батареї [48-95].

Технологічні операції виробництва електродів та інших деталей, а також складання акумуляторів проводять в особливих сухих кімнатах або герметичних боксах в атмосфері чистого аргону.

При складанні акумуляторів застосовують складні сучасні технології зварювання та конструкції гермовиводів.

Закладка активних мас електродів є компромісом між бажанням досягти максимуму розрядної ємності акумулятора й вимогою гарантувати безпечну його роботу для запобігання утворення металевого літію (і тим самим можливості

займання). Збільшення активних мас потенційно знижує рівень безпеки при експлуатації акумулятора.

Акумулятори збирають у розрядженому стані. Для приведення в дію їх необхідно зарядити.

При першому циклі заряду-розряду літій-іонні акумулятори втрачають частину ємності, тому що у процесі першого заряду крім впровадження літію в структуру вуглецевого матеріалу відбувається розкладання електроліту з утворенням плівки, що має лише іонну провідність. Утворення пасивної плівки призводить до незворотної втрати до 20-30 % закладеної ємності. Для зниження цих втрат рекомендують як добавки в електроліт, так і різного роду обробку поверхні вуглецевого матеріалу. Починаючи із другого циклу, процес розряду і заряду літій-іонного акумулятора зводиться до переносу іонів літію від анода до катода й назад. Коефіцієнт використання по струму при цьому близький до одиниці.

Літієві акумулятори працюють за рахунок окислювально-відновної реакції. Літій використовують в якості анода, він володіє найбільшим електродним потенціалом (-3 V). У хімії літій – найактивніший з металів, він володіє величезним ресурсом зберігання енергії. Елементи на основі літію можуть виробляти напругу до 3,7 V. Але лабораторні зразки здатні виробляти напругу близько 4,5 V.

Літій – найлегший метал, тому його використання зменшує вагу акумулятора. Катод у літієвих 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).



Рисунок 4.1 – Схема роботи літійового акумулятора

У сучасних літійових акумуляторах чистий літій не застосовується. Зараз поширені три типи літійових 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 літійових акумуляторів розрізняють за матеріалом катода або типом електроліту. В Li-ion 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 .

Li-Ion акумулятори

Такі акумулятори широко використовуються в промисловому обладнанні та повсякденному використанні (рис. 4.2). Вони мають високу енергетичну щільність, порядку 100Вт·г/кг, і забезпечують приблизно 300-500 циклів заряд/розряд.



Рисунок 4.2 – Схема конструкції літійового акумулятора

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].

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-літієві і полімерно-літієві 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-літієві 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. 4.3).

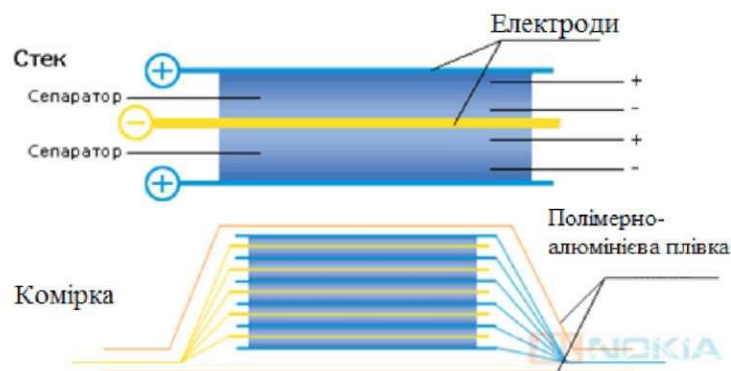


Рисунок 4.3 – Схема внутрішньої структури Li-Pol-акумулятора

Товщина однієї секції близько 0,6 мм. Залежно від кількості стеків можна отримати акумулятор тієї чи іншої ємності. Зовні джерело живлення загортають в полімерно-алюмінієву плівку.

Суттєвих обмежень в конструктивному виконанні ці акумулятори не мають, і можуть виготовлятися в будь-якій конфігурації. Як правило, зовнішня корпусна частина літій-полімерних батарей виконується з металізованого полімеру.

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);
- гель-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].

У порівнянні з рідкими електролітами в літій-іонних акумуляторах, полімерні електроліти мають меншу іонну провідність, яка до того ж додатково знижується при температурі нижче нуля. Тому проблема розробок Li-Pol акумуляторів складається не тільки в пошуку іммобілізованого електроліту з досить високою провідністю, сумісного з електродними матеріалами, а й у розширенні температурного діапазону Li-Pol акумуляторів.

Уже в першому поколінні літій-полімерних акумуляторів підбором співполімерів вдалося домогтися високої міцності електродів, а іонну

провідність електроліту батарей збільшити практично втричі. Всі розробники відзначають, що на якість Li-Pol акумуляторів і стабільність їх роботи сильно впливає однорідність полімеру, на яку впливають як співвідношення компонентів електроліту, так і температура полімеризації [32].

Комбінацією окремих Li-Pol акумуляторів виконують побудову літій-полімерних акумуляторних батарей (ЛПАБ), які допускає формування паралельних ланцюжків з п акумуляторів для забезпечення необхідної ємності. Потрібна напруга ЛПАБ забезпечується послідовним з'єднанням окремих акумуляторів або ланцюжків. Таким чином, приєднання акумуляторів по паралельно-послідовній схемі можна отримати ЛПАБ заданої ємності і напруги [33,34].

Наразі, ЛПАБ перетворилася на одні з найбільш поширених і потужних джерел струму які застосовують для забезпечення роботи сучасних електричних транспортних засобів, зокрема безпілотних повітряних суден (БПС).

4.2 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 літійового електрода, тому робоча напруга Li-ion акумулятора має характерне значення 3 В і вище [48-95].

Матеріали на основі кобальту вимагають контролера для керування процесами заряд-розряд. Li/NiO₂ (літій/оксид нікелю) має вищу ємність, ніж оксид кобальту, але він складний у виготовленні й може мати проблеми в плані техніки безпеки. Тому для підвищення безпеки в акумуляторах великої ємності почали використовувати змішані оксиди кобальту й нікелю (20-30 % нікелю).

При розряді Li-ion 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-ion акумулятора. Для всіх типів Li-ion 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, невпорядковану аморфну або частково впорядковану (кокс, піролізний або мезофазний вуглець, сажа та ін.).

Іони літію при впровадженні розштовхують шари вуглецевої матриці і розташовуються між ними, утворюючи інтеркаляти різноманітних структур. Питомий обсяг вуглецевих матеріалів у процесі інтеркаляції-деінтеркаляції іонів літію значно не змінюється.

Крім вуглецевих матеріалів як матрицю негативного електрода використовують структури на основі олова, срібла і їх сплавів, сульфідів олова, фосфати кобальту, композити вуглецю з наночастками кремнію.

Процеси на позитивному електроді Li-ion акумулятора. Якщо в первинних літійових батареях застосовуються різноманітні активні матеріали для позитивного електрода, то в літійових 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].

Під час їх заряджання використовується метод CC-CV. Тобто, спочатку батарея заряджається деяким фіксованим струмом (constant current – CC), при цьому напруга на стеках батареї зростає. По досягненні напругою 4,2 V на кожній банці батарея вже заряджена приблизно на 95 %. Далі зарядний пристрій переходить до другої фази алгоритму заряду CV (constant voltage – постійна напруга) [48-95].

Таким чином, можна зробити висновок, що літій-полімерні акумулятори почесно зайняли провідне місце в сучасній техніці і широко використовуються

для живлення як телефонів та невеликих дитячих іграшок, так і автомобілів та БПЛА.

Роботу саме цього типу акумуляторів було досліджено в рамках даної дисертації, оскільки вони є основним джерелом живлення БПЛА та перспективним напрямком розвитку технологій.

Струм поступово знижується так, щоб напруга на кожному стеці не перевищила 4,2 V. Ця величина визначається хімічним складом Li-Pol батареї. Перевищення її допустимо не більше, ніж до 4,25V, а досягнення значення 4,3 V і вище загрожує вибуховим самозайманням [36].

Фазою заряду CV в польових умовах можна знехтувати: вона додає тільки останні 5 % ємності, але займає від третини до половини загального часу заряду при заряді струмом 1C. Тому можна припиняти заряд по досягненні батареєю максимального значення напруги, заощаджуючи час [37].

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].

Звідси виникає проблема експлуатації Li-Pol-акумуляторів, яка полягає в тому, що при заряджанні необхідно контролювати напругу на кожному з стеків, щоб не вивести акумулятор з ладу, а при подальшому розряджанні всі стеки розряджалися однаково, але не нижче допустимого мінімуму. Звичайний зарядний пристрій може контролювати напругу на батареї в цілому, але при великому діапазоні напруг на стеках цілком можливий варіант, коли напруга на одному з них ще 4,05 V, а на другому вже 4,3 V. Контрольний модуль зарядного пристрою вимірює тільки сумарну напругу 8,35 V і продовжує заряджати батарею до 8,4 V ($4,2 \cdot 2$). При цьому напруга на другому стеку перевищує 4,3 V, що з великою ймовірністю призведе до займання [41]. При розряді незбалансованої батареї ця ж проблема здатна привести до перерозряду окремо

взятого стека незважаючи на те, що сумарна напруга ще вище, ніж 3 V помножене на кількість стеків[42].

Для вирішення цієї проблеми використовується спеціальний пристрій, який називається балансир[43,44]. Під час заряду він стежить за напругою на кожному із стеків і вирівнює значення їх напруг між собою. При цьому зарядний пристрій припинить процес заряду вчасно, не виводячи акумулятор з ладу. При розрядженні збалансованої батареї на споживачі всі стеки також розряджаються більш-менш рівномірно, і при зниженні сумарної напруги до 3 V на стек повинно спрацювати відсічення регулятора, що запобігатиме виходу батареї з ладу. Багато сучасних зарядних пристроїв вже мають вбудований балансир, яким обов'язково слід користуватися, підключаючи окремий балансувальний роз'єм батареї поряд з силовим і вибираючи відповідний режим заряду [45]. Для пристроїв, що не мають вбудованого балансиру, слід застосовувати окремий зовнішній пристрій.

Примусово розряджати або циклювати літєвий акумулятор немає ніякого сенсу, так як ці батареї не мають ефекту пам'яті і повинні зберігатися в зарядженому стані (найбільш оптимальний режим зберігання – 60 % заряду). Струм розряду акумулятора може бути будь-яким, але не більше його номіналу, зазначеного на етикетці також в одиницях величини ємності C[48].

При заряді літій-іонних акумуляторів орієнтуються також на напругу акумулятора. У початковий період, коли лише з'явилися літій-іонні акумуляторні батареї, що використовують графітову систему, було потрібне обмеження напруги зарядження з розрахунку 4,1 В на елемент. У цей час літій-іонні елементи можна заряджати до напруги 4,20 В. Припустиме відхилення напруги становить усього лише близько $\pm 0,05$ В на елемент [19].

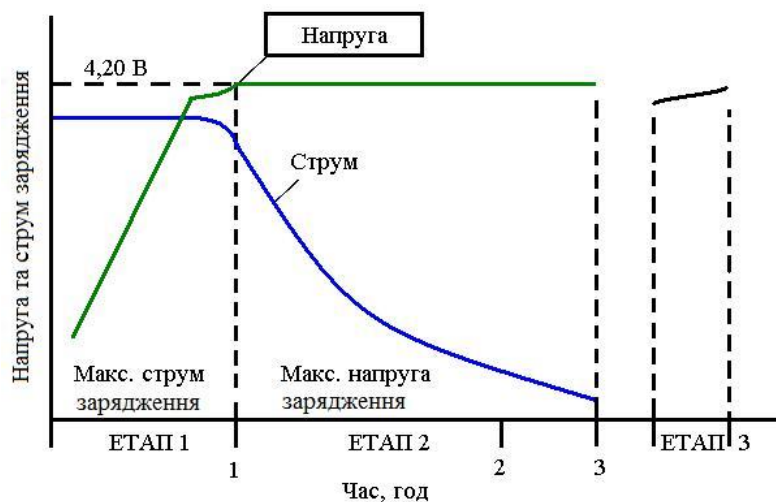


Рисунок 4.4 – Стандартний процес зарядження літій-іонного акумулятора [19]

4.3 Пристрої захисту 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.

Як зазначалося вище, ЛПАБ володіють рядом переваг порівняно з іншими ХДС, однак при використанні літій-полімерних АБ неприпустимі наступні ситуації:

- надмірні струми заряду або розряду;
- коротке замикання;
- перезаряд акумуляторів вище або нижче певних рівнів напруги;
- перевищення максимально допустимого значення температури акумуляторів[51].

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.

– ЛПАБ допускають формування паралельних ланцюжків з п акумуляторів для забезпечення необхідної ємності. Таким чином, приєднанням акумуляторів по паралельно-послідовній схемі можлива побудова ЛПАБ заданої ємності і

напруги. Однак, кожен акумулятор або кожен ланцюжок вимагають певного контролю. При заряджанні таких ЛПАБ заряд окремих елементів відбувається нерівномірно, що викликано технологічними розбіжностями внутрішніх опорів акумуляторів, або нерівномірним зниженням ємності акумуляторів внаслідок їх старіння в процесі експлуатації. При строго фіксованих кінцевих напругах заряду і розряду для окремого акумулятора різниця від циклу (заряд-розряд) до циклу буде збільшуватися і призводити до поступово зростаючого недозаряду і недорозряду ЛПАБ, тобто, фактично до зниження ємності.

До деформації (здуття) ЛПАБ можуть призвести наступні ситуації: падіння / удари АБ (наприклад, зі столу на підлогу), навіть при короткочасному короткому замиканні на виході (наприклад, якщо при пайку роз'ємів випадково коротнуть висновки), якщо при експлуатації акумулятор зберігався в розрядженому стані, якщо при експлуатації розрядні струми були занадто великі, якщо при експлуатації використовувався неправильний / неприпустимий алгоритм і параметри зарядки, заводський брак.

Всі зазначені фактори можуть спричиняти аварійні ситуації аж до загоряння або вибуху акумулятора, тому при використанні ЛПАБ необхідно обов'язково звертати увагу на зовнішній стан батареї [53]. Якщо її корпус має деякі деформації, необхідно відмовитися від використання такої батареї для забезпечення використовуваного обладнання та попередження аварійних ситуацій.

Контрольні питання до розділу 4

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 5 Методи заряду акумуляторних батарей

Заряд акумуляторних батарей виробляють від джерела постійного струму. При цьому позитивний полюс джерела з'єднують з позитивним висновком батареї, а негативний – з негативним. Для протікання зарядного струму необхідно, щоб напруга зарядного пристрою було більше е. д. с. батареї.

Найбільш широко поширені два способи заряду: при постійному зарядному струмі і постійному напруженні. Рідше застосовуються модифікований заряд, при якому змінюються струм і напруга, і прискорений заряд, який представляє собою заряд великими струмами.

При будь-якому способі заряду температура електроліту в батареях повинна бути не вище 35 °С [93].

Заряд при постійному зарядному струмі. Застосовується на зарядних станціях і в акумуляторних відділеннях автотранспортних підприємств. Досягається сталість зарядного струму різними способами: регулюванням напруги зарядного агрегату; зміною опору реостата, включеного в ланцюг заряду; застосуванням різних стабілізаторів струму.

Більшість зарядних агрегатів (пристроїв) мають або ступінчасту, або плавне регулювання напруги за рахунок зміни коефіцієнта трансформації. Тому періодично, у міру зміни зарядного струму, обертанням рукоятки встановлюють необхідну зарядний струм. При включенні в зарядний ланцюг реостата відбуваються непродуктивні втрати електроенергії на нагрів реостата.

Коли батарея буде заряджена на 85-90%, для підтримки необхідної сили струму заряду необхідно підвищити напругу до значення, при якому починається розкладання води, що супроводжується виділенням на поверхні електроліту бульбашок водню і кисню. На розкладання води збільшують споживання енергії. Тому для заряду повністю розрядженого батареї методом постійного струму необхідно їй повідомити в 12-15 рази більша кількість електрики в порівнянні з отриманим при розряді. В кінці заряду при позитивних температурах електроліту напруга на одному акумуляторі може досягати 27 В. При цьому спостерігається швидке підвищення температури електроліту. При підвищенні температури

електроліту до 45 °С рекомендується знизити зарядний струм в 2 рази або припинити заряд для охолодження електроліту до 30-35 °С.

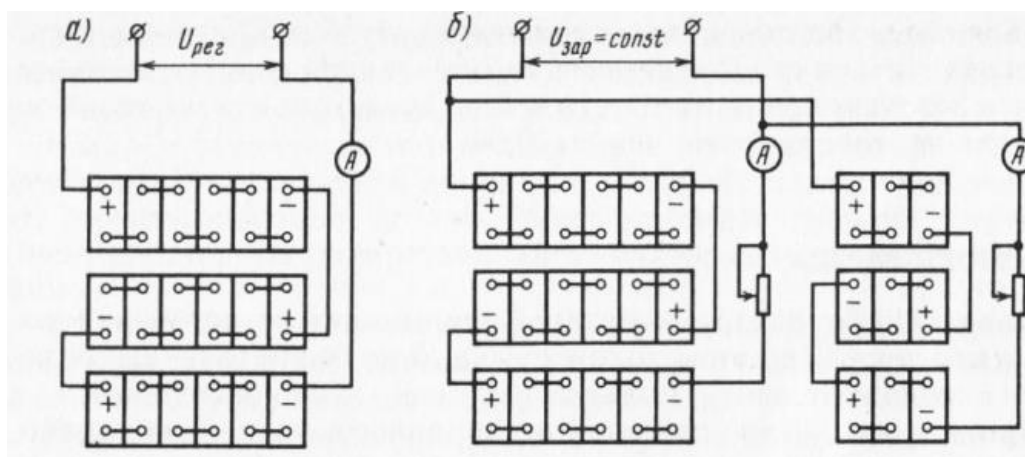


Рисунок 5.1 – Схеми включення акумуляторних батарей на заряд

Батарея вважається зарядженою, якщо у всіх акумуляторах спостерігається сталість величини щільності електроліту протягом 2 год.

Зазвичай на заряд від регульованого джерела підключається група послідовно з'єднаних батарей (рис. 5.1 а) однієї або близькою за величиною ємності. Якщо зарядний агрегат забезпечує великі струми, до нього можна підключити паралельно кілька груп батарей (Рис. 5.1 б) з включеними послідовно в кожній групі реостатом і амперметром. Аналогічна схема включення застосовується і при нерегулярному джерелі струму.

Кількість послідовно з'єднаних батарей в групі підбирають в залежності від максимального вихідного напруги зарядного агрегату виходячи з того, щоб на кожен акумулятор доводилося напруга 27 В [54].

Кількість груп батарей, підключаються паралельно для одночасного заряду, приймається в залежності від сили струму, яку забезпечує зарядний агрегат, і сили струмів заряду окремих груп і визначається з умови, що сума струмів всіх груп не повинна перевищувати величину струму зарядного агрегату.

Якщо в різних групах різні типи батарей, то розрахунок опору реостата ведеться окремо для кожної групи.

Заряд при сталості напруги рідко застосовується на зарядних станціях. При цьому способі напруга в процесі заряду підтримується постійним, а зарядний струм змінюється в такий спосіб. На початку заряду е. д. з. акумуляторної батареї знижена (через низьку щільності електроліту), і струм досягає максимальних значень.

Тривалість заряду при постійній напрузі практично однакова з тривалістю заряду при постійному струмі.

Перевагою розглянутого способу є менша газовиділення в кінці заряду внаслідок меншої напруги. Недоліком є необхідність застосування більш потужного зарядного агрегату в порівнянні з методом заряду постійним струмом. При цьому його потужність повністю використовується тільки на початку заряду [83].

Заряд при постійній напрузі використовується в процесі експлуатації батареї на автомобілі. Однак на автомобілі батарея працює в циклічному режимі, коли короткочасний розряд чергується з зарядом. Тому сильно розряджену батарею не доводиться заряджати на автомобілі, і зазначені вище недоліки не виявляються.

При сильній розрядженої батареї її знімають з автомобіля для підзарядки або, не знімаючи, заряджають прискореним методом від стороннього джерела.

Прискорений заряд.

Застосовується у випадках надмірного розряду батареї в процесі експлуатації і при необхідності відновити її працездатність в короткий час. Причиною підвищеного розряду може з'явитися несправність генераторної установки на автомобілі.

Перевагою прискореного заряду, крім скорочення часу заряду, є виняток трудовитрат на зняття батареї з автомобіля, її доставку в зарядний відділення і установку назад на автомобіль.

Для виконання зазначеної умови установка Е411 для прискореного заряду забезпечена спеціальним пристроєм для точного визначення ступеня розрядженого.

Установка E411 дозволяє заряджати одночасно одну акумуляторну батарею.

Режим прискороного заряду може успішно застосовуватися для швидкого підвищення характеристик батареї при низькій температурі безпосередньо перед пуском двигуна. Такий режим називають передпусковим підзарядом, проводять його протягом 7-10 хв.

Зрівняльний заряд. При зрівняльний заряд переслідується мета повністю забезпечити відновлення активних мас електродів всіх акумуляторів батареї. Заряд ведеться до тих пір, поки у всіх акумуляторах щільність електроліту не буде постійною протягом 3 год. Як правило, потреба в зрівняльний заряд виникає у батареї після тривалої експлуатації, коли в батареях з'являються акумулятори з підвищеним ступенем розрядженого.

Заряд акумуляторних батарей асиметричним струмом

Звичайно кислотні акумуляторні батареї заряджають постійним струмом. Але метод заряду постійним струмом має ряд недоліків таких, як необоротна сульфатація негативних пластин і необхідність у контрольно-тренувальних циклах. В [36] пропонується заряджати кислотні акумуляторні батареї асиметричним струмом. Те, що при заряді кислотних акумуляторних батарей асиметричним струмом необоротна сульфатація негативних пластин не виникає, а отже відпадає необхідність у контрольно-тренувальних циклах, на даний момент являється загально визнаним фактом. Такий спосіб заряду забезпечує рівномірний об'ємний розподіл концентрації електроліту, включаючи область пір усередині активної маси, оскільки фронт дифузії не встигає віддалитися на помітну відстань від поверхні електрода при періодичній зміні напрямків струму. У результаті досягається збільшення зарядної ємності q_3 на 10-15%, скорочення часу заряду t_3 на 10-15% (у порівнянні з параметрами, одержуваними при заряді постійним струмом), а також підвищення ресурсу акумуляторної батареї [6, 7]. Але навіть сучасні схеми зарядних пристроїв асиметричним струмом мають невисокий ККД, що стає на заваді до використання асиметричного струму для заряду кислотних акумуляторних батарей, хоча він і має такі суттєві переваги у

порівнянні з зарядом постійним струмом.

Заряд акумулятора ведуть доти, поки не наступить рясне газовиділення (кипіння) у всіх банках, а напруга і щільність електроліту будуть постійними протягом двох годин підряд. Це є ознакою закінчення заряду. Потім варто зробити зрівнювання щільності електроліту в секціях і продовжити заряд ще 30 хвилин для кращого перемішування.

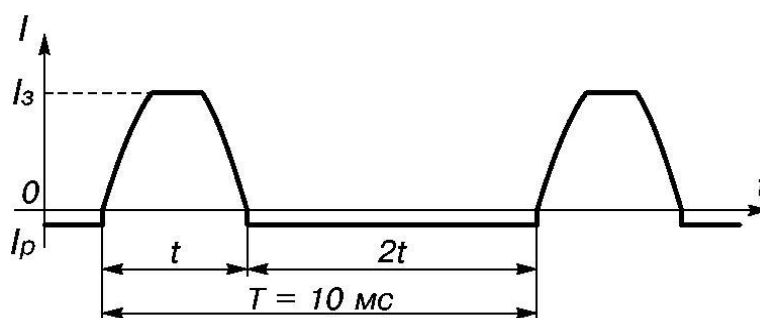


Рисунок 5.2 – Діаграма зарядного асиметричного струму

Під час заряду акумулятора варто періодично перевіряти температуру електроліту, щоб не допустити її підвищення вище 45°C в холодних і помірних кліматичних зонах і вище 50°C в жарких і теплих вологих [37].

5.1 Залежність струму заряду від ємності акумуляторних батарей

У якості досліджуваних акумуляторів було обрано моделі з наступними паспортними даними:

Тип: Li-іон; напруга $3,7 \text{ V}$; максимальна напруга $4,2 \text{ V}$; ємність 1650 mAh ; рік випуску 2012.

LG BL-44JH: Тип: Li-іон; напруга $3,8 \text{ V}$; максимальна напруга $4,35 \text{ V}$; ємність 1700 mAh ; рік випуску 2013.

Тип: Li-іон; напруга $5,2 \text{ V}$; ємність 6500 mAh ; рік випуску 2014.

З отриманих даних можна визначити реальну ємність акумуляторів. Для батареї Zoro ZP100DC паспортна ємність становить 1650 mAh , виміряна ємність – 1542 mAh ; для LG BL-44JH паспортна ємність – 1700 mAh , виміряна – 1671 mAh ; для Lenovo Yoga Tablet 2-830L MT-60068 паспортна ємність – 6500 mAh , виміряна – 5962 mAh . Можна зробити висновок, що за час користування

акумуляторами номінальна ємність зменшилася для Zoro ZP100DC на 6,54%, для LG BL-44JH на 1,71%, для Lenovo Yoga Tablet 2-830L MT-60068 на 8,28%.

Для подальшого аналізу даних ми побудували для кожного акумулятора по два графіка залежності (рис.5.3–5.11):

1. напруги від часу зарядки та ємності акумулятора;
2. сили струму від часу зарядки та ємності акумулятора.

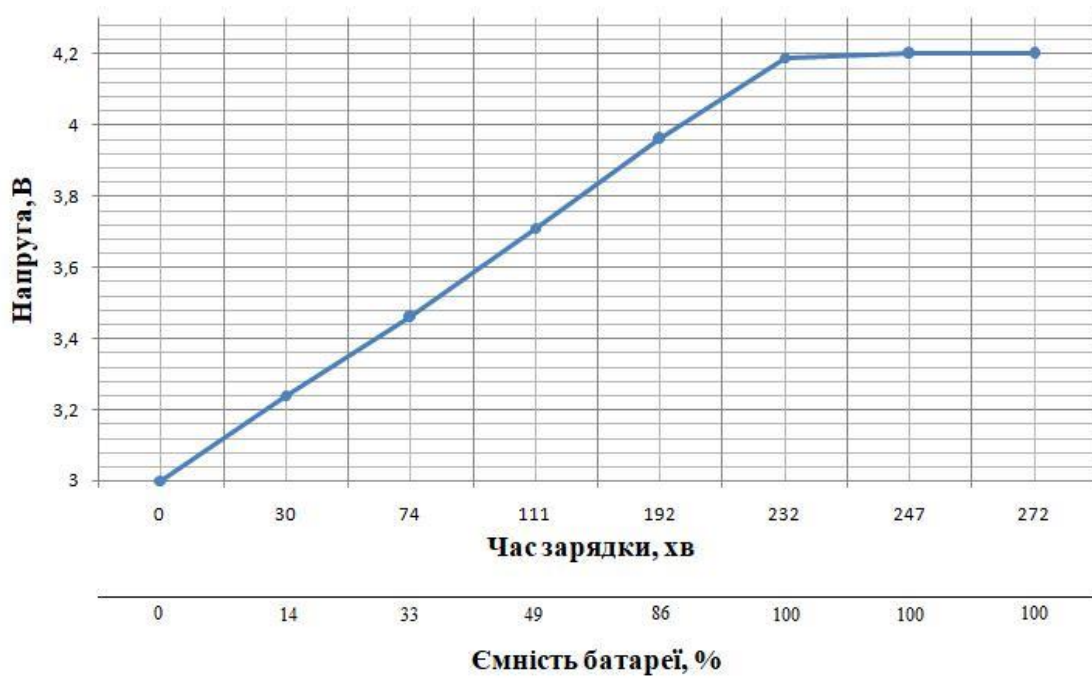


Рисунок 5.3 – Графік залежності напруги від часу зарядки та ємності батареї для акумулятора Zoro ZP100DC

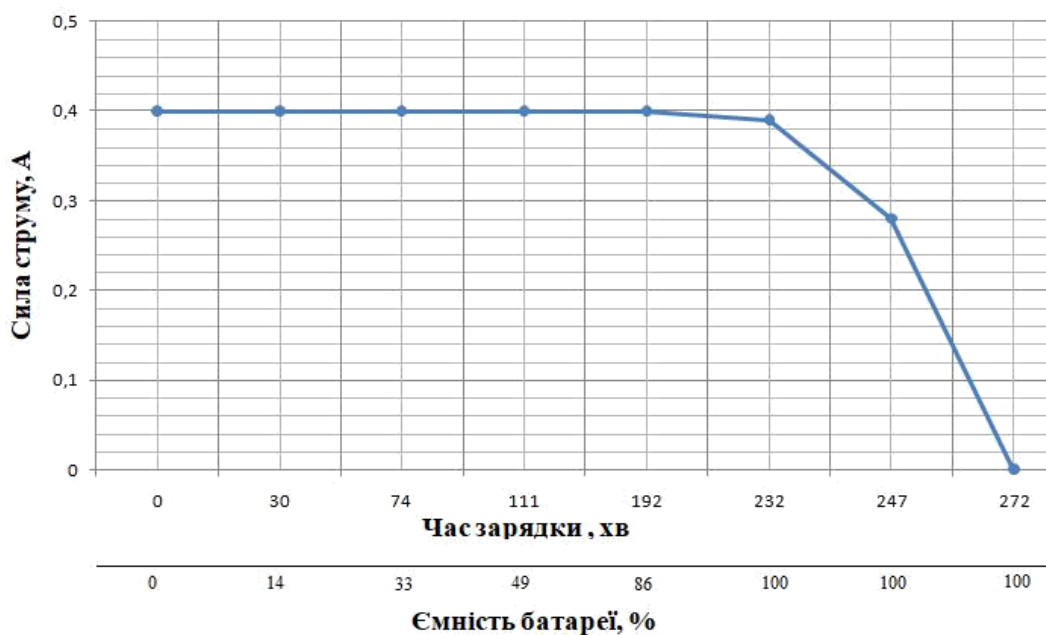


Рисунок 5.4 – Графік залежності сили струму від часу зарядки та ємності батареї

для акумулятора Zoro ZP100DC

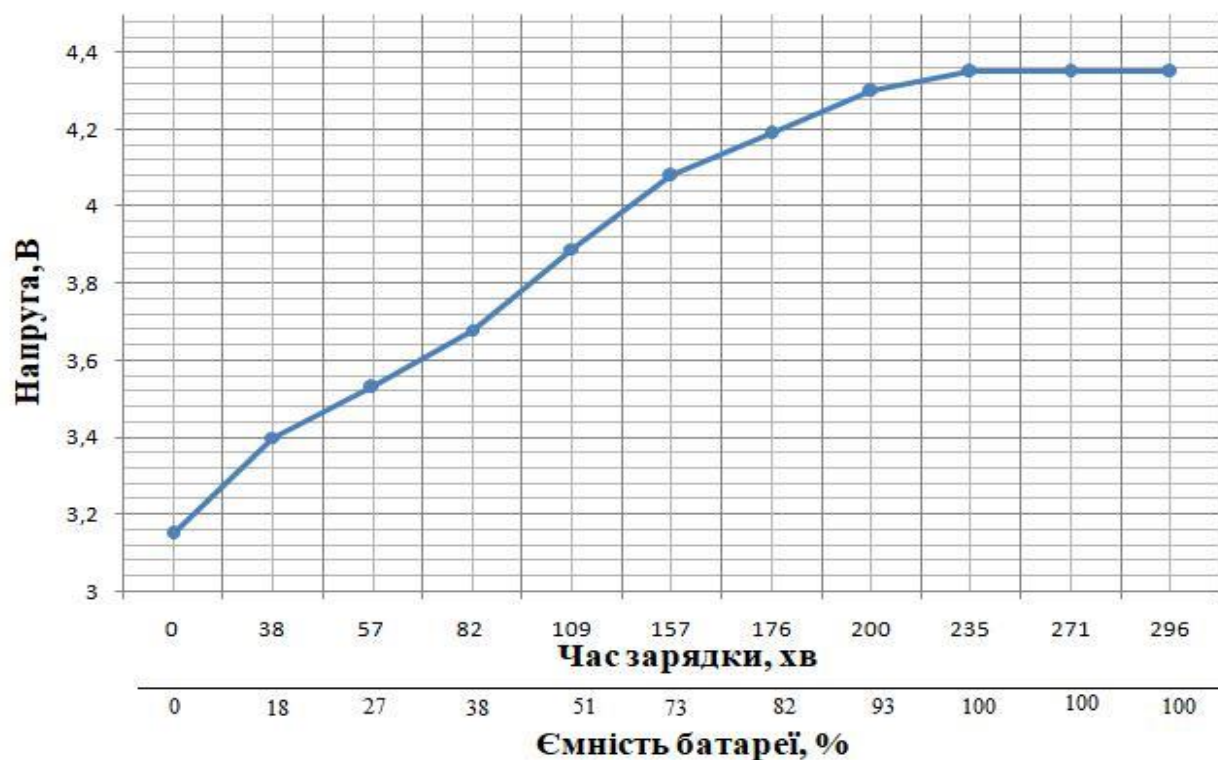


Рисунок 5.5 – Графік залежності напруги від часу зарядки та ємності батареї для акумулятора LG BL-44JH

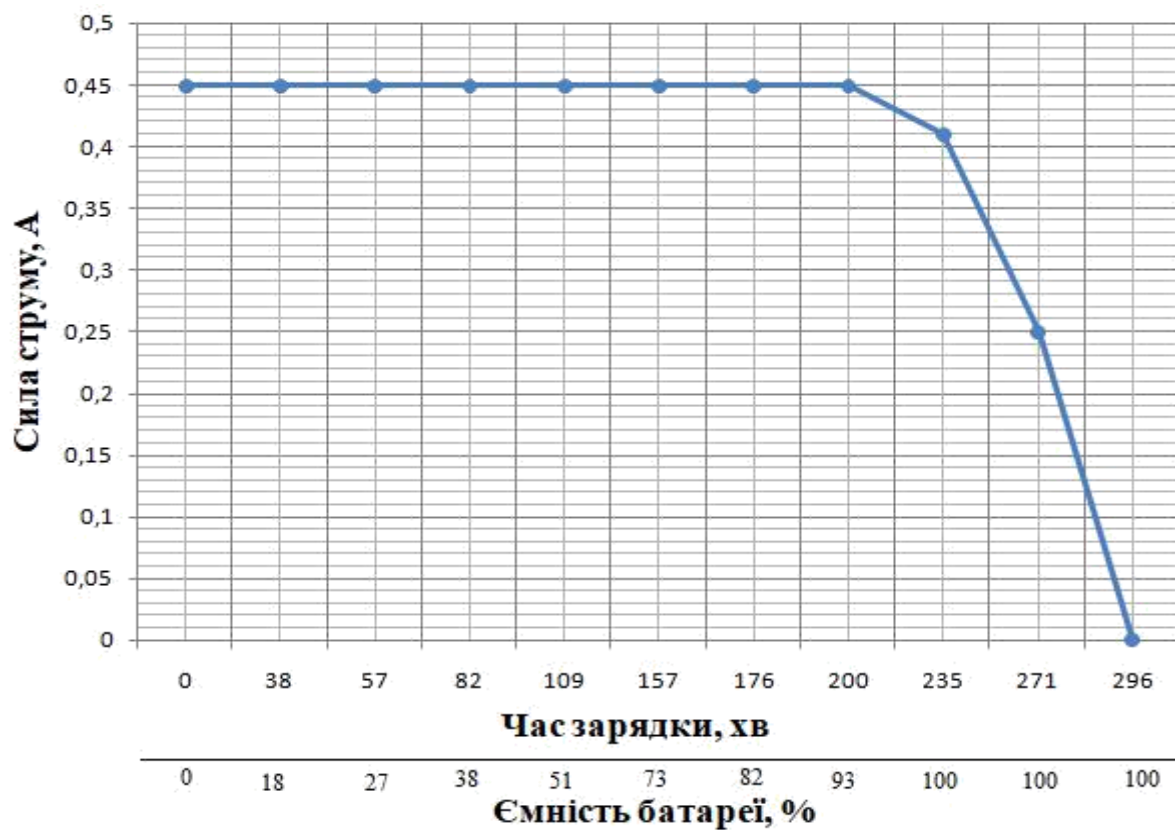


Рисунок 5.6 – Графік залежності сили струму від часу зарядки та ємності батареї

для акумулятора LG BL-44JH

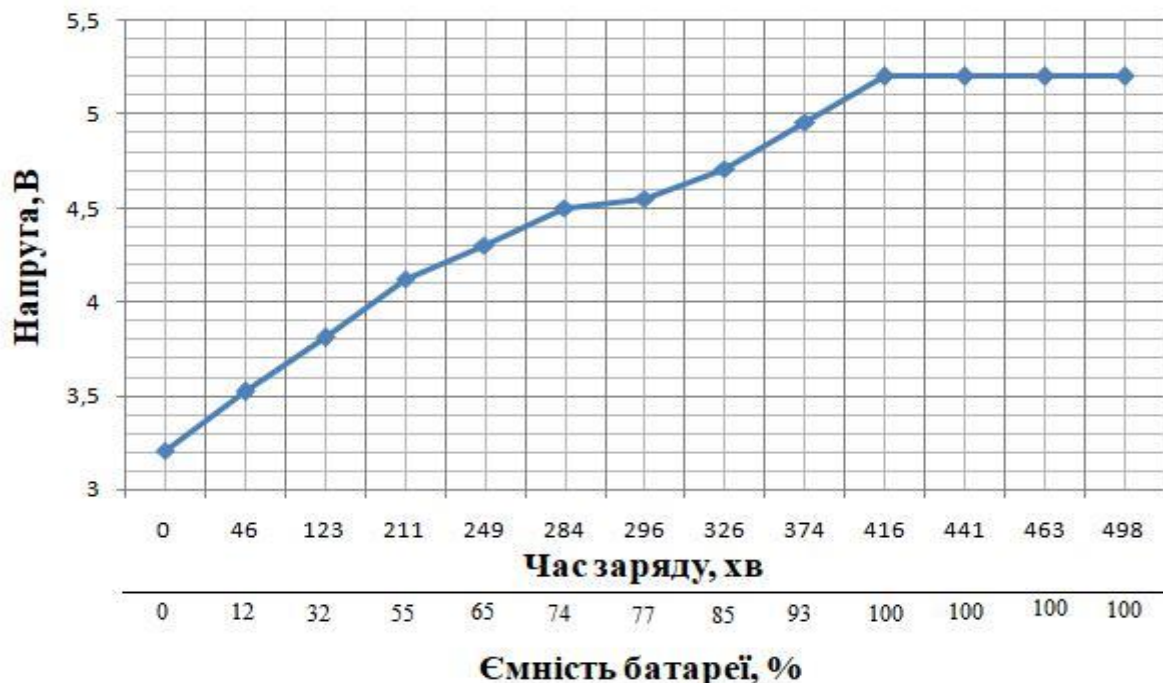


Рисунок 5.7 – Графік залежності напруги від часу зарядки та ємності батареї для акумулятора Lenovo Yoga Tablet 2-830L MT-60068

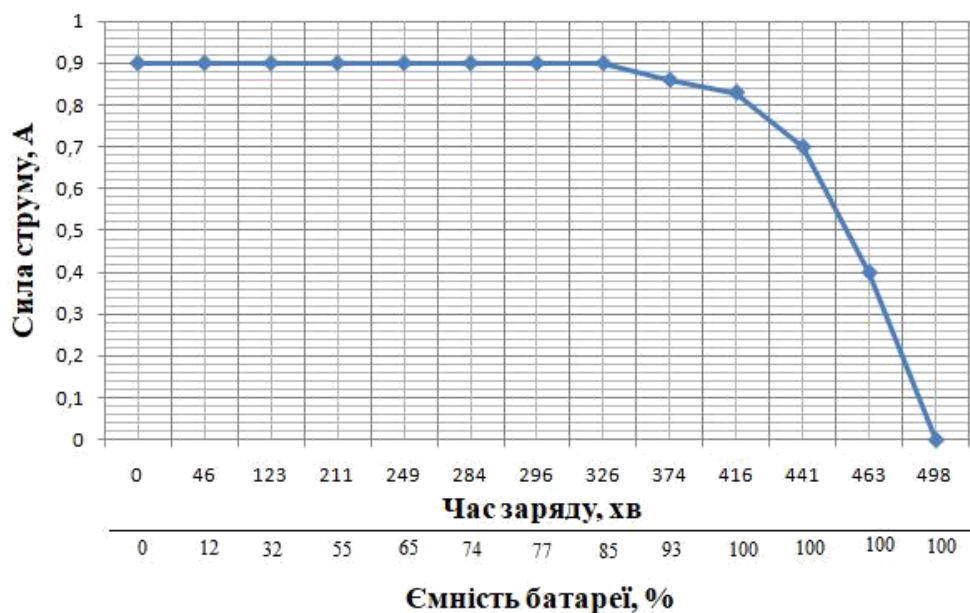


Рисунок 5.8 – Графік залежності сили струму від часу зарядки та ємності батареї для акумулятора Lenovo Yoga Tablet 2-830L MT-60068

Видно, що процес заряду акумуляторів здійснюється складним шляхом. Спочатку проводиться заряд при постійному значенні сили струму (для акумулятора Zoro ZP100DC – 0,4 А, для LG BL-44JH – 0,45 А, для Lenovo Yoga Tablet 2-830L MT-60068 – 0,9 А), поки напруга на ньому не досягне граничного

значення напруги (для Zoro ZP100DC – 4,2 В, для LG BL-44JH – 4,35 В, для Lenovo Yoga Tablet 2-830L MT-60068 – 5,2 В). Далі процес заряду продовжується при постійній напрузі, сила струму в цьому випадку зменшується в часі. Процес зарядки закінчується коли сила струму дорівнює нулю.

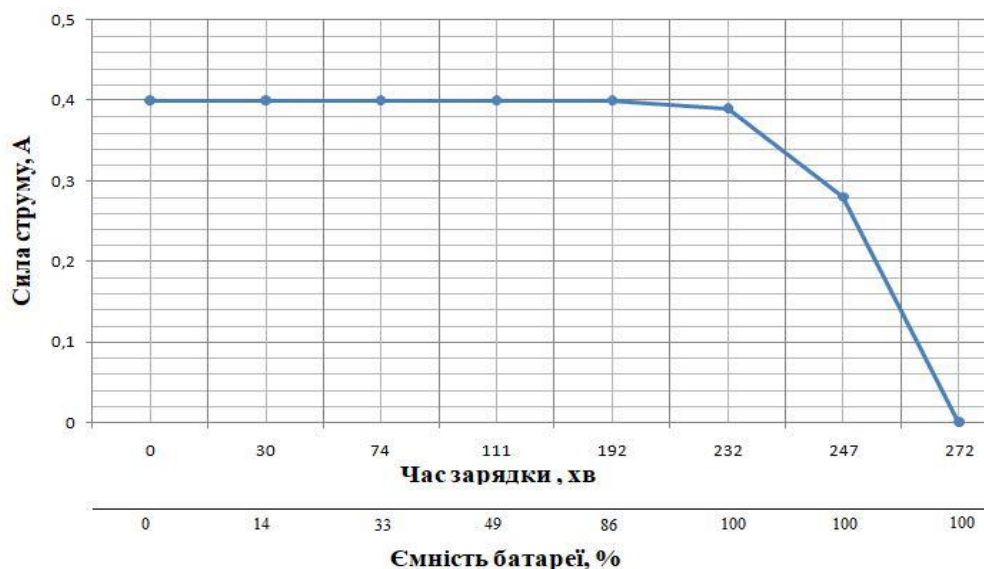


Рисунок 5.9 – Графік залежності сили струму від часу зарядки та ємності батареї для акумулятора Zoro ZP100DC

5.2 Глибина заряду

Заряд акумулятора відбувається, якщо до нього прикладений потенціал, що перевищує його напругу. Струм заряду акумулятора пропорційний різниці прикладеної напруги і напруги холостого ходу.

Швидкість заряду акумулятора може бути визначена в термінах ємності. Якщо ємність акумулятора C заряджається за час t , то швидкість заряду визначається відношенням C/t . Акумулятор ємністю 100 А·год при розряді зі швидкістю $C/5$ цілком розрядиться за 5 годин, при цьому струм розряду складе $100/5$, або 20 А. Якщо акумулятор заряджається зі швидкістю $C/10$, то струм його заряду буде дорівнює $100/10$, або 10 А. Швидкість заряду можна оцінити в тривалостях циклу. Так, якщо акумулятор заряджається за 5 годин, то говорять, що він має цикл 5 годин.

При заряді акумуляторів застосовують наступні способи заряду:

- при постійному струмі ($I=const$);
- при постійній напрузі ($U=const$);
- комбінований спосіб – заряд при постійному струмі до досягнення на акумуляторі визначеної напруги, яка потім підтримується постійною доти, поки струм не знизиться до визначеного значення;
- переривчастим струмом [6]; асиметричним струмом [6].
- залежності від області застосування акумуляторів розрізняють ще деякі різновиди вищезгаданих способів заряду:
- швидкий заряд; циклічний заряд;
- плаваючий заряд – метод підтримки підзаряджаємої батареї при повному заряді шляхом подачі зворотної постійної напруги для компенсації в ній різних втрат;
- компенсаційний підзаряд – метод, при якому для приведення батареї в цілком заряджений стан і підтримки її в цьому стані;
- використовується постійний струм заряду.

При швидкому заряді потрібно від 4 до 6 годин, у той час як тривалість розряду в штатному режимі варіюється від 10 до 15 годин. При циклічному заряді потрібна постійна напруга або постійний струм заряду. Іноді використовується плаваючий заряд, під час якого навантаження й акумулятор включаються паралельно, або компенсаційний підзаряд, коли потужність постійного струму подається в навантаження, у той час як ланцюг заряду акумулятора з навантаженням не з'єднаний.

5.3 Особливості заряду при низьких та високих температурах

Існує багато різних методів заряду акумуляторів. Але все їх можна розділити на 4 основні групи:

- стандартний заряд – заряд постійним струмом, рівний $1/10$ від величини номінальної ємності акумулятора, протягом приблизно 15 годин;
- швидкий заряд – заряд постійним струмом, рівний $1/3$ від величини

номінальної ємності акумулятора протягом приблизно 5 годин;

– прискорений або дельта V заряд – заряд з початковим струмом заряду, рівним величині номінальної ємності акумулятора, при якому постійно вимірюється напруження на акумуляторі і заряд закінчується після того, як акумулятор повністю заряджений. Час заряду приблизно 1 година;

Стандартний заряд або заряд постійним струмом з дозуванням кількості електрики, минулої через акумулятор, за часом (стандартний заряд) є одним з найбільш поширених методів заряду герметичних акумуляторів. Як показує досвід, для повного заряду розрядженого акумулятора з урахуванням зниження коефіцієнта використання струму в кінці заряду йому необхідно повідомити при температурі 20 ± 5 °C біля 110, а з урахуванням звичайно наявного технологічного запасу - біля 120% номінальної ємності. Подальший заряд до 150% номінальної ємності, хоч і не позначається практично на розрядних характеристиках, приводить проте до деякого розігрівання акумуляторів, що обумовлює підвищений саморазряд при зберіганні в зарядженому стані. Продовження заряду з повідомленням акумулятору більше за 150% номінальних ємності може привести до деформації судини і виходу акумулятора з ладу, якщо не прийняти заходів до зниження струму заряду [53].

Допустиме значення перезарядки значною мірою визначається жорсткістю стінок судини і зарядним струмом. Так, акумулятори циліндричної форми витримують значно більшу перезарядку, ніж призматичні. Що ж до зарядного струму, то для забезпечення малого підвищення тиску при заряді (щоб виключити деформацію навіть призматичних акумулятор при повідомленні їм 120 - 150% номінальних ємності) рекомендується значення зарядного струму, як правило, чисельно рівне 0,1 номінальних ємності акумулятора C_n . Цей режим (струм рівний $0,1 C_n$, час – 12 - 14 годин) прийнятий за номінальний режим заряду повністю розрядженого герметичного акумулятора. Необхідно відмітити, що обмеження зарядного струму зумовлене не тільки максимально допустимим тиском, але також і граничним допустимим розігріванням.

Оптимальною температурою середі для заряду акумулятора є 20 ± 5 °C [8].

Заряд при підвищених температурах помітно знижує перенапруження виділення кисня, що приводить до недозаряду позитивного електрода і зменшенню розрядної ємності. Зарядна характеристика при цьому стає значно більш пологою в порівнянні із зарядною кривою при температурі 20 °С при загальному зниженні рівня зарядного напруження.

Заряд при знижених температурах, навпаки, істотно збільшує крутизну зарядної характеристики і підвищує використання струму [93].

Після повідомлення акумуляторам більше за 120% ємності при нормальній і підвищеній температурах спостерігається деяке зниження зарядного напруження. Це пов'язано з розігріванням акумулятора при перезаряді, оскільки вся надлишкова енергія, повідомлена акумулятору на заряді, в кінцевому результаті перетворюється в теплоту. Міра розігрівання при інших рівних умовах визначається умовами теплосъема і залежить від температури навколишнього повітря, наявності примусової циркуляції, взаємного розташування акумуляторів і їх типоразмерів. У малогабаритних акумуляторів розігрівання в кінці заряду практично не відчувається навіть в ході заряду при підвищених температурах, в той час як у акумуляторів ємністю біля 100 А·год, особливо при роботі їх в складі батареї, навіть при знижених температурах в кінці заряду спостерігається помітне розігрівання.

Заряд акумуляторів струмами нижче номінальних дозволяє істотно збільшити міру перезаряду без ризику деформації судин і перегріву. При зниженні струму заряду до $(0,01 \pm 0,005) C_n$ тривалість перезаряду може дійти місяця, а під струмом $(0,002 \pm 0,001) C_n$ акумулятори можуть знаходитися необмежено довго. При цьому малий струм подзаряду практично тільки компенсує саморазряд акумулятора, підтримуючи останній весь час на верхньому рівні зарядженості. Такий режим широко використовується в системах аварійного живлення, коли акумуляторна батарея працює, а основний генератор струму відключений.

Заряд постійним струмом з обмеженням тривалості заряду за часом вимагає повністю розряджених акумуляторів. У іншому випадку тривалість заряду

повинна бути скорректирована так, щоб за час заряду акумулятору було повідомлено біля 120% ємності, знятої на попередньому розряді, що в більшості випадків важко реалізувати в зв'язку з відсутністю надійного способу визначення міри зарядженности акумулятора.

Для управління ЗУ використовується мікроконтроллер ATtiny13 сімейства AVR фірми Atmel. Він здійснює контроль напруження на батареї, а так само забезпечує контроль ланцюгами зоря/розряд і всього процесу. Елементами управління ланцюгами заряду/розряду є транзистори, які керуються мікроконтроллером МК по засобом наявності певного напруження на АКБ. Перед початком заряду акумулятор розряджається до напруження 1 вольт на елемент, після чого автоматично включається на заряд. При заряді починає працювати стабілізатор струму СТ, вихідний зарядний струм якого регулюється резистором. Індикація складається з світлодіодів, які оповіщають про стан батареї – заряд, розряд, закінчення заряду. Заряд здійснюється стабільним струмом $0,1 C_n$ протягом 15 годин. Після закінчення цього часу акумулятор автоматично відключається від зарядного пристрою. Джерелом живлення всього пристрою служить блок живлення нестабілізований мережевий адаптер БПН 12-03 з вихідним напруженням 12 вольт і струмом навантаження 300 мА.

Прискорення процесу заряду стало можливим як внаслідок модернізації самих джерел струму, так і завдяки вивченню можливості контролю процесу при великих його швидкостях і успіхами електронної техніки, що дозволяв реалізувати цей контроль [98].

Для значної частини сучасних акумулятор допускається прискорений заряд: струмом $0,3 C_n$ з контролем за часом (але не більш 4 годин). Необхідністю зменшення міри перезаряду при такому режимі заряду пов'язана з більш швидким зростанням тиску в акумуляторі в кінці процесу, оскільки швидкість виділення кисня збільшується, а швидкість перенесення його до негативного електрода і поглинання залишається практично незмінною. Розрядна ємність акумулятора при вказаній густині струму заряду не меншає. Заряд в прискореному режимі допускається в діапазоні температур від +5 до +50 0С.

Потрібно відмітити, що багато які сучасні акумуляторні батареї витримують досить тривалу перезаряд стандартними струмами заряду без пошкодження, тому їх можна заряджати і при наявності залишкової ємності. Але систематичні перезаряди значно скорочують термін служби. Тому, якщо немає упевненості в повному вичерпанні ємності батареї, перед зарядом доцільно розрядити її до 1 В. Процес перепідготовки при цьому довшасяє. Однак доразряд перед кожним зарядом не тільки мало зручний в експлуатації, але і шкідливий, оскільки приводить до скорочення терміну служби [99].

Проведення заряду в прискореному режимі з істотним збільшенням зарядного струму зв'язується з жорстким обмеженням ємності, що повідомляється, контролем тиску, а так само температури, оскільки даний метод має тенденцію до перегріву акумулятора, особливо при заряді струмом близьким до $1C_n$.

Найбільш точним і надійним способом управління процесом заряду нікель - кадмиевих акумуляторних батарей є спосіб управління зарядом за допомогою мікроконтролера, який здійснює моніторинг напруження батареї і відключає її при його характерному вимірюванні. Такою характерною зміною є різке незначне зниження напруження на батареї в кінці заряду. Його називають негативним дельта V. Зниження напруження в кінці заряду для нікель – кадмиевих батарей становить 10...30 мВ на елемент.

Повільна зміна зарядних характеристик батарей, що виражається, як правило, в збільшенні крутизни зарядної кривої, приводить до поступового зниження ємності із-за недозаряда. Крім того, прагнення виключити можливість перезаряда веде до вибору декілька занижених значень установок. Внаслідок цього фактичний рівень зарядженості при обмеженні заряду по датчиках напруження навіть з використанням термозависимих датчиків в ході експлуатації складає в середньому 60 - 80% фактичних ємності. Для відновлення характеристик і підвищення рівня зарядженості при обмеженні тривалості заряду по датчиках напруження рекомендується періодично провести глибокі розряди батареї.

Проте, завдяки простоті і надійності схем контролю заряду з контролем по напруженню досить широко використовується в автономних системах електроживлення, особливо при роботі батареї в буферному режимі з основним генератором струму, коли неможливо забезпечити контроль і ємності, що повідомляється, що знімається.

Як правило, даний метод комбінований з швидким методом заряду, що дозволяє усунути головну нестачу останнього – відсутність надійного критерію закінчення заряду [100].

5.4 Принципи розрахунку акумуляторних батарей

Відповідно до Правил експлуатування акумуляторних свинцевих стартерних батарей колісних транспортних засобів і спеціальних машин, виконаних на колісних шасі

Приклад розрахунку кількості одночасно заряджуваних АБ від одного джерела електричної енергії

Завдання. Визначити число АБ типу 6 СТ-72, підключених до генератора постійного струму потужністю 10500 Вт, шунтовий реостат якого регулює напругу в межах від 90 В до 135 В.

Послідовність розрахунку

1. Згідно з пунктом 3.13 цих Правил наприкінці заряджання необхідно забезпечити номінальну напругу на полюсних виводах АБ (16,2+0,3) В. Тому для розрахунку приймаємо найбільше значення напруги 16,5 В.

2. Кількість (n) послідовно з'єднаних АБ 6 СТ-72 в одну групу:

$n = 135 \text{ В} : 16,5 \text{ В}$ приблизно 8,2 (шт.). Приймаємо $n = 8$ (округлено до меншого цілого числа).

3. Величина струму електричної навантаги в зарядній мережі:

$I_n = 10500 \text{ Вт} : 135 \text{ В}$ приблизно 77,77 (А).

4. Величина зарядного струму:

$I_3 = 0,1 \cdot C = 0,1 \cdot 72 = 7,2$ (А).

5. Кількість (m) паралельно приєднаних до зарядної мережі груп послідовно з'єднаних АБ:

$$m = I_{\text{н}} : I_{\text{з}} = 77,77 : 7,2 \text{ приблизно } 10,8.$$

Приймаємо $m = 10$ (округлено до меншого цілого числа).

6. Кількість АБ, які можна одночасно заряджати генератором:

$$N = n \cdot m = 8 \cdot 10 = 80 \text{ шт.}$$

Граничний стан АБ – це стан АБ, за якого подальша експлуатація неприпустима. Граничний стан АБ визначають за результатами перевірки ємності АБ розрядженням силою струму, рівною 5 відсотків номінальної ємності.

Контрольні питання до розділу 5

1. Опишіть методи заряду акумуляторних батарей.
2. Які є принципи акумуляторних батарей?
3. Які особливості зарядних характеристик різних типів акумуляторних батарей?
4. У чому особливості заряду при низьких та високих температурах?
5. Яка залежність струму заряду від ємності акумуляторних батарей?

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].

Якщо Ви виявили, що авто не вдається завести, це значить, що його акумулятор розряджений. Для запуску доведеться хоча б частково підзарядити АКБ. У випадку, якщо батарея довго не заряджалась і знаходиться у стані глибокого розрядження, запуск двигуна за допомогою стартера буде неможливий. Це може статися взимку – при холодних температурах АКБ розряджаються дуже швидко. Якщо ви зрозуміли, що батарея сильно розрядилася, не обов'язково придбавати новий акумулятор, достатньо один раз купити зарядний пристрій для АКБ, і в подальшому використовувати його для відновлення заряду.

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.

Переваги зарядних пристроїв Dnipro-M

ЗП нашого бренда підійдуть власникам будь-яких машин, тому що мають наступні переваги [94].

Універсальність

На відміну від пристроїв, здатних заряджати акумулятори тільки легкових (12 В) або вантажних (24 В) автомобілів, наші ЗП підходять обом категоріям транспорту. На корпусі зарядних пристроїв для АКБ є перемикач вибору режиму – 12 або 24 вольт, елементи індикації та амперметр для відтворення сили струму. Довжина дротів формує робочу зону радіусом 3,1 м – в більшості випадків для заряджання не знадобиться подовжувач.

Безпека

Зарядний пристрій для акумулятора має декілька рівнів захисту:

- Захист від перегрівання. Навіть якщо температура пристрою стане надто високою, воно відключиться, поки не охолоне.
- Захист від замикання. На корпусі встановлений плавкий запобіжник, який забезпечує розмикання електричного ланцюга у випадку короткого замикання. Завдяки цьому, внутрішні елементи ланцюга залишаються неушкодженими.
- Захист від неправильного підключення. Акумулятор, що заряджається, та зарядка для авто не вийдуть з ладу, навіть якщо напруга на клеммах не буде відповідати типу АКБ, або Ви переплутаєте полярність — ЗП просто не буде подавати струм. Тим не менш, перед увімкненням пристрою потрібно обов'язково перевірити положення тумблерів.

Зручне використання

Зарядні пристрої автоматично регулюють величину струму на виході, змінюючи її по мірі заряджання акумуляторної батареї.

Щоб почати заряджання акумулятора, достатньо вибрати режими, підключити пристрій до стаціонарного джерела струму або генератора, та закріпити затискачі ЗП на клеммах акумулятора (червоний кабель на клемі “плюс”, а чорний – на “мінус”). По мірі заряджання, пристрій буде сам регулювати струм на виході. Коли акумулятор зарядиться, слід відключити пристрій від живлення та зняти затискачі. Згідно правилам безпеки, вкрай не рекомендується залишати пристрій при заряджанні у приміщенні без догляду.

Оцінити стан свого акумулятора можна за допомогою вольтметра. На клеммах АКБ вимірюють напругу, не відключаючи його від бортової мережі. Низькі показники (нижче 12,6 В) говорять про падіння напруги та необхідності зарядити батарею [95].

Щоб акумулятор прослужив довше, слід періодично перевіряти в ньому рівень електроліту, корегуючи його, якщо він знизився. Увагу слід приділяти також щільності електроліту, перевіряючи її після повного зарядження.

На практиці найчастіше використовується швидкий заряд акумулятора (до 90% ємності) з наступним автоматичним переключенням на меншу швидкість заряду (до повної ємності).

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 $R2$, застосовується трививідний інтегральний стабілізатор напруги, наприклад $KP149EH5A$.

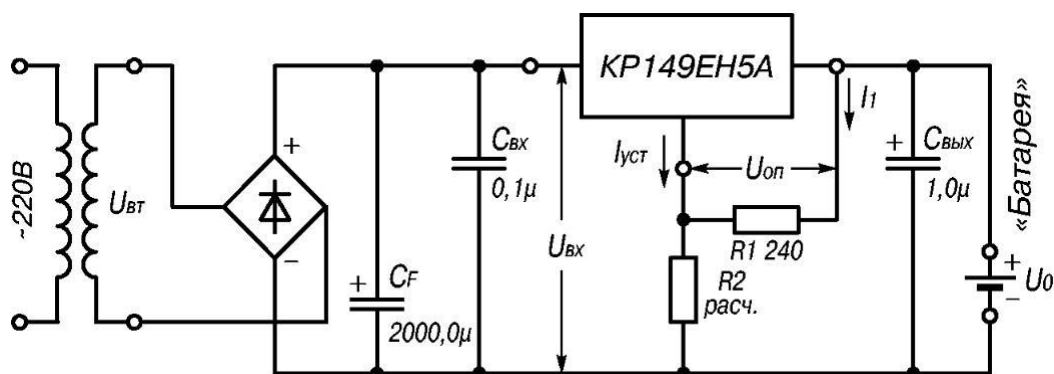


Рисунок 6.1 – Схема зарядного пристрою з постійною вихідною напругою (режим плаваючого заряду)

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 12В при максимальному струмі порядку 100мА. Світлодіод показує ступінь заряду акумулятора. При цілком зарядженому акумуляторі він гасне [96].

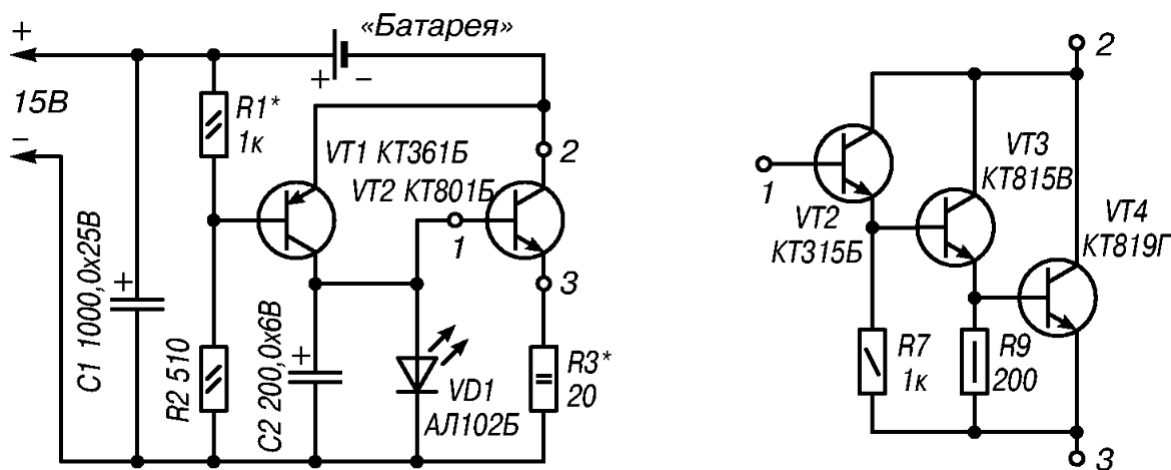


Рисунок 6.2 – Схема автоматичного зарядного пристрою (режим плаваючого заряду)

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 неважно збільшити до 5 A. У цьому випадку транзистор VT2 необхідно замінити складеним транзистором рис. 1.7, забезпечивши останній з них тепловідводом [3].

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].

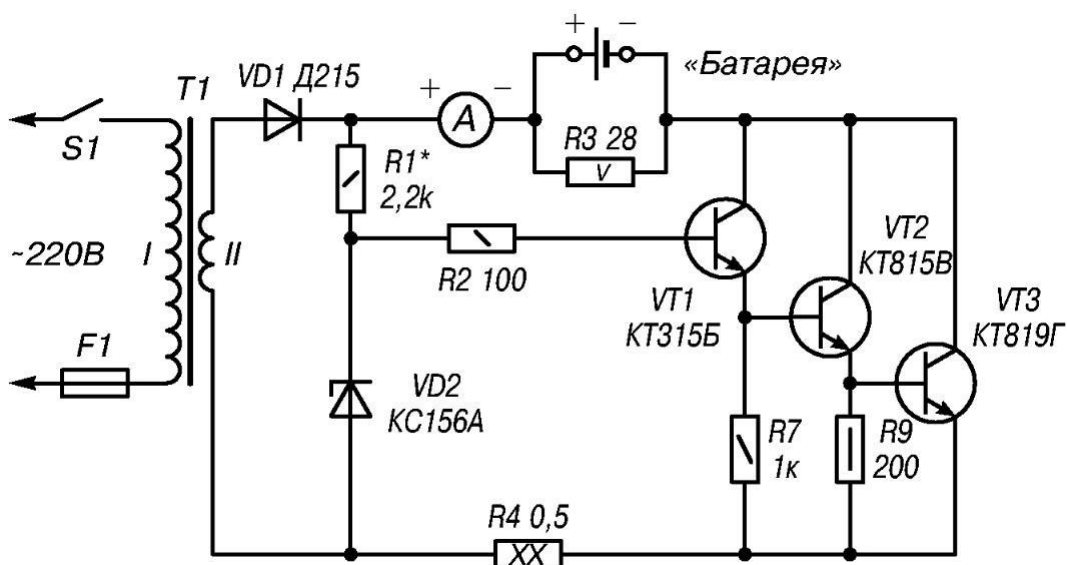


Рисунок 6.3 – Схема заряду акумулятора асиметричним струмом

За час одного періоду змінної напруги формується один імпульс зарядного струму. У проміжку між зарядними імпульсами формується розрядний імпульс через резистор R3, 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 R3 підключений паралельно акумуляторів.

При використанні аналогового амперметра він буде показувати біля однієї третини від амплітуди імпульсу зарядного струму. Схема захищена від короткого

замикання виходу.

6.2 Зарядні пристрої свинцево-кислотних акумуляторних батарей

Експлуатація до зберігання полузаряжених акумуляторів – одна з головних причин скорочення їх терміну служби. Що знаходиться на зберіганні заряджений акумулятор через деякий час в результаті саморазрядки переходить в полузаряженне 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. Зарядний пристрій виконано на основі транзисторного двутактного перетворювача напруги з автотрансформаторной зв'язком і може працювати в двох режимах – джерела струму і джерела напруги. При вихідному струмі, меншому деякого граничного значення, воно працює як зазвичай – в режимі джерела, напруги. Білі спробувати збільшити струм навантаження понад цього значення, вихідна напруга буде різко зменшуватися – пристрій перейде в режим джерела струму. Режим джерела

струму (володіє великим внутрішнім опором) забезпечений включенням баластного конденсатора в первинну ланцюг перетворювача [98].

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].

Найпростіше зарядний пристрій для автомобільних та мотоциклетних акумуляторних батарей, як правило, складається з понижуючого трансформатора і підключеного до його вторинної обмотці двуполуперіодного випрямляча [1]. Послідовно з батареєю включають потужний реостат для встановлення необхідного зарядного струму. Однак така конструкція виходить дуже громіздкою і зайво енергоємною, а інші способи регулювання зарядного струму звичайно її суттєво ускладнюють.

У промислових зарядний пристрій для випрямлення зарядного струму і зміни його значення іноді застосовують тріністори КУ202Г. Тут слід зауважити, що пряма напруга на включених тріністорах при великому зарядному струмі може досягати 1,5 В. Через це вони сильно нагріваються, а за паспортом температура корпусу тріністора не повинна перевищувати + 85 ° С. У таких пристроях доводиться вживати заходів щодо обмеження та температурної стабілізації зарядного струму, що призводить до подальшого їх ускладнення та подорожчання.

Описується нижче порівняно просте зарядний пристрій має широкі межі регулювання зарядного струму - практично від нуля до 10 А - і може бути використано для зарядки різних стартерних батарей акумуляторів на напругу 12В.

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].

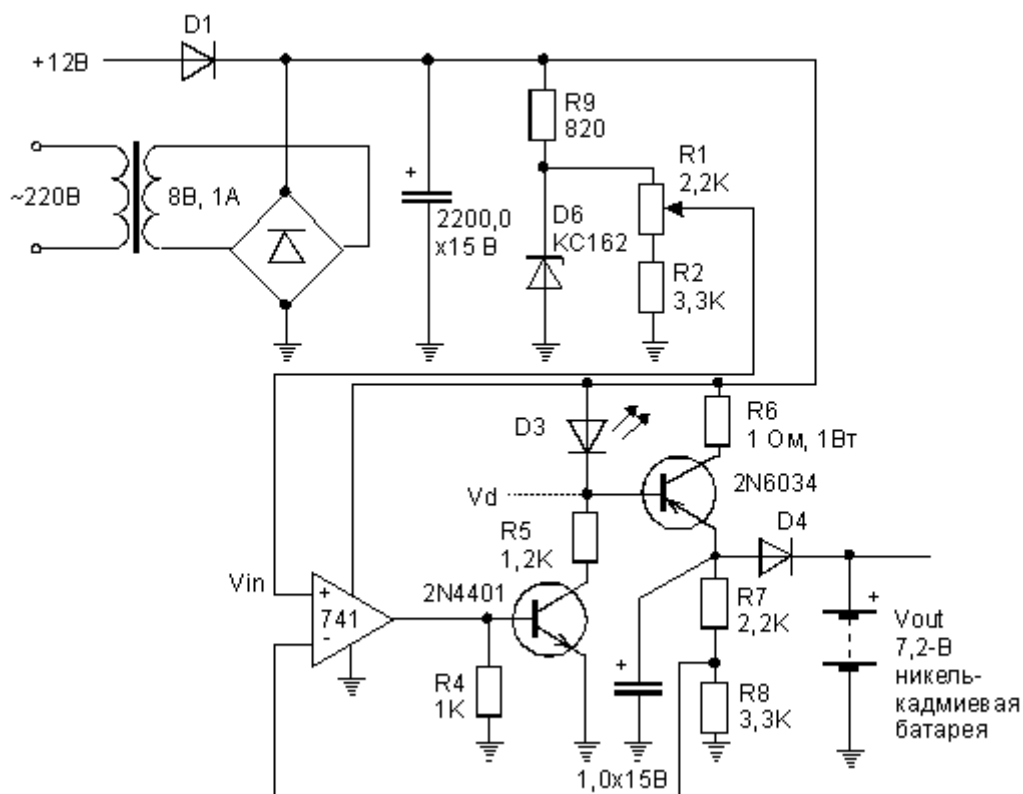


Рисунок 6.4 – Схема зарядного пристрою нікель-кадмієві акумуляторних батарей

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 $V_{out} = V_{in} (R_7 + R_8) / R_8$.

За наведених значеннях компонентів схема виробляє зарядний струм 400 мА, який можна змінювати, підбираючи R6 до досягнення максимального значення, рівного 1 А. Задається 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-батареї, що задається 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, пилососи 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].

Під час зарядки необхідно постійно стежити за струмом, підтримуючи його на певному рівні. Для скорочення часу зарядний струм збільшують, він може досягати значення, чисельно рівного 100% ємності акумулятора. Якщо за таких

умов не відстежити момент повної зарядки, можливо накопичення газів всередині акумулятора і збільшення тиску аж до його механічного пошкодження і виходу з ладу.

Ступінь зарядженості можна контролювати, постійно вимірюючи температуру корпусу акумулятора. Цей метод заснований на так званому негативному температурному коефіцієнті (близько $-1 \text{ мВ} / ^\circ\text{C}$) 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 обнародованні 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.

Метод виявлення максимуму є сьогодні найбільш точним способом визначення моменту закінчення зарядки Ni-Cd і Ni-MH акумуляторів. Напруга на висновках акумулятора при постійному зарядному струмі є монотонно зростаючу функцію. Після повного зарядження акумулятора, він перестає запасати енергію, а біля плюсового електрода починає накопичуватися газ. Це призводить до швидкого підвищення температури та зменшення напруги на висновках акумулятора. Спеціалізована мікросхема (в описуваному зарядному пристрої TEA1101) через певні інтервали вимірює поточне напруга на заряджає акумулятор і порівнює його з попереднім виміром. Якщо результат порівняння приймає негативне значення, т. Е. Поточна напруга менше попереднього, і подібне явище повторюється при декількох десятках вимірювань – зарядний пристрій переходить в режим консервативної зарядки струмом в межах $1/20 \dots 1/80$ від номінальної ємності акумулятора. Консервативна зарядка не веде до подальшого виділення газу в акумуляторі і не заподіює йому шкоди [102].

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.

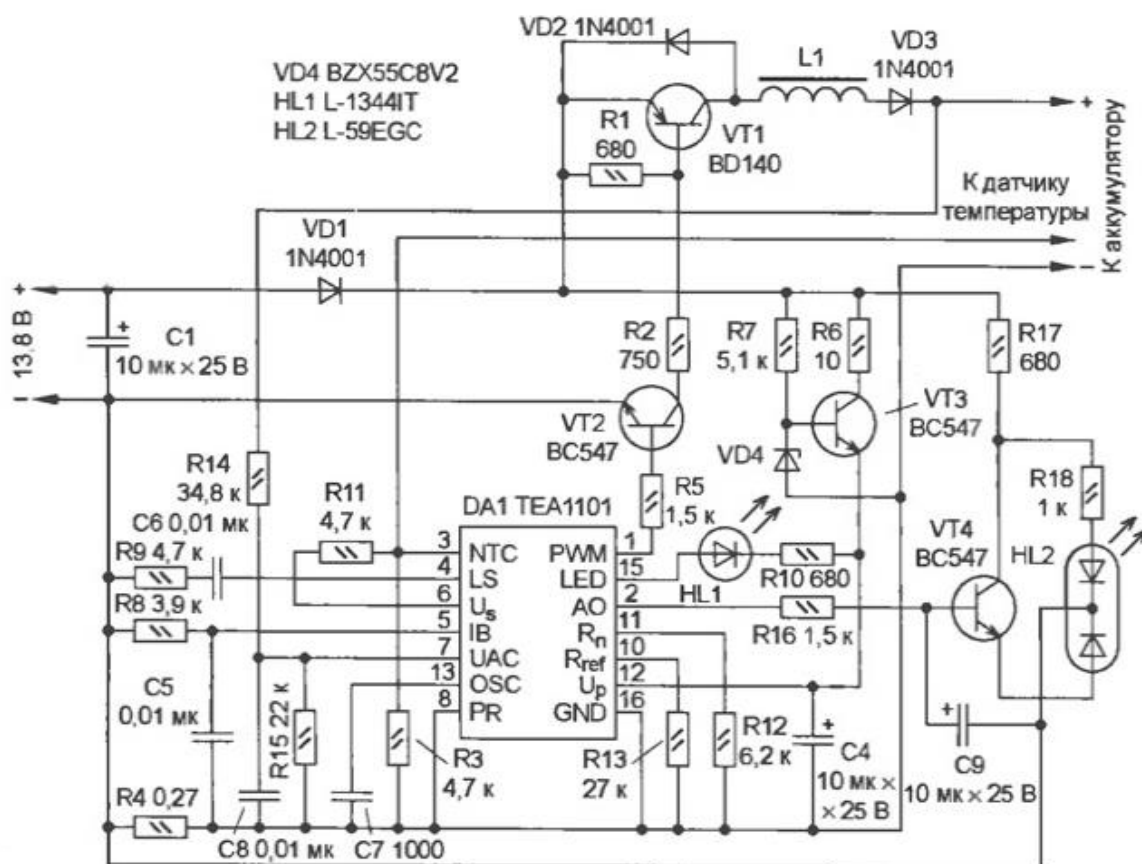


Рисунок 6.5 – Схема «інтелектуального» зарядного пристрою нікель-кадмієві акумуляторних батарей

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 IB 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].

Імпульсне регулювання зарядного струму має всі переваги ШИ-регуляторів перед лінійними – більш високий ККД, мала розсіювання потужності на регулюючому елементі і т. п. Описується зарядний пристрій побудовано саме за принципом ШИ-регулювання, а аналоговий сигнал поданий на вузол управління VT4R16 – R18 двоколірним світлодіодом HL2, за кольором і яскравістю якого можна приблизно судити про зарядному струмі. Максимально яскраве світіння червоного світлодіода означає, що акумулятор заряджається прискорено (транзистор VT4 максимально відкритий). Плавний перехід від червоного через помаранчевий колір до зеленого говорить про зменшення регулюючого напруги і прикритті регулюючого елемента. Яскраве зелене свічення настає з моменту переходу в режим консервативної зарядки.

На жаль, подібна індикація не дозволяє точно визначити момент досягнення повного заряду. Однак у мікросхемі TEA1101 передбачений спеціальний вихід LED для управління світлодіодом. Цей світлодіод (HL1) в різні фази зарядки поводить по-різному, тим самим надаючи повну інформацію про події в зарядному пристрої процесах. Якщо світлодіод не світиться або світиться дуже слабо, можливо пульсує з малим рівнем яскравості, акумулятор не підключений до зарядного пристрою. Постійно і яскраво світить – йде прискорена зарядка акумулятора. Яскраво блимає – акумулятор повністю заряджений. Якщо при першому включенні сигналізація така ж, як і при закінченні зарядки, акумулятор, швидше за все, вийшов з ладу і відновленню не підлягає. Природно, у всіх цих ситуаціях треба звертати увагу ще й на

двоколірний світлодіод, його світіння говорить про те, йде реально зарядка чи ні.

Спочатку промисловий пристрій було призначене для зарядки акумуляторів або батарей, що складаються з двох або трьох акумуляторів ємністю 600 ... 700 мА·год. Однак цей пристрій можна піддати нескладній доробки, в результаті якої його можливості істотно розширюються. Справа в тому, що всі параметри зарядного пристрою можна задати шляхом підбору відповідних елементів і напруги живлення [105].

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) його підзарядити, не обов'язково домагаючись при цьому повною (100% -ної) зарядки.

Саме такий принцип покладено в основу роботи описуваного пристрою, призначеного для зарядки акумулятора LGR18650E (його характеристики практично такі ж, як і у ICR-18650 фірми NEC [2]). При необхідності, використовуючи наведені в статті розрахункові формули, можна модифікувати пристрій для зарядки акумулятора з іншими характеристиками.

Принципова електрична схема пристрою зображена на рис.6.6. Його основа – спеціалізована мікросхема DA1 TSM101A, що випускається в корпусах D1P8 і S08.

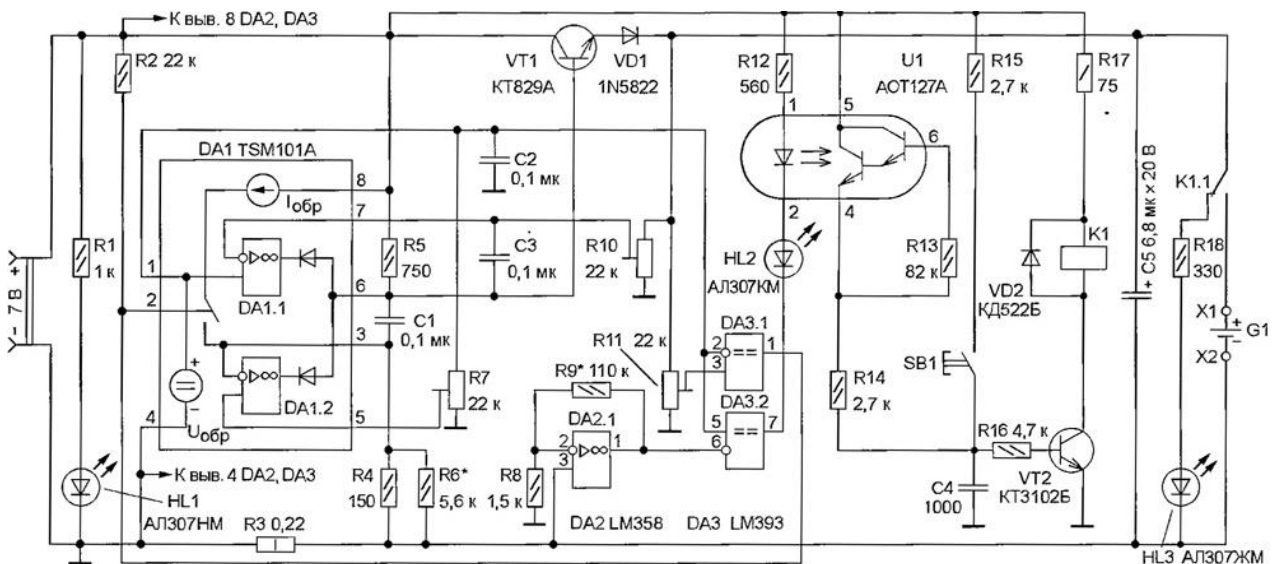


Рисунок 6.6 – Схема «інтелектуального» зарядного пристрою нікель-кадмієві акумуляторних батарей

Як відомо, Li-ion акумулятори спочатку необхідно заряджати постійним струмом, а після досягнення заданого рівня напруги він повинен зменшуватися за експоненціальним законом [2]. У пропонованому пристрої ОУ DA1.2 порівнює сигнал з датчика струму зарядки – резистора R3 – з частиною зразкового напруги $U_{обр} = 1,24$ В, що знімається з движка резистора R7, і відкриває транзистор VT1 рівно настільки, наскільки це необхідно для створення необхідного падіння напруги на датчику струму. Причому в пристрої

передбачений так званий режим кондиціонування при зарядці глибоко розрядженого акумулятора.

Розрахуємо параметри пристрою. Оскільки тепловий моніторинг заряджає акумулятор в даному випадку не передбачено, обмежимося максимальним струмом зарядки $I_{зар} = 1$ А. Звичайно, його можна збільшити до 1,6 А, але в цьому випадку необхідно врахувати рекомендації, викладені, наприклад, в [3]. Невикористаний в даному випадку ОУ мікросхеми DA2 дозволяє легко реалізувати термоконтроль заряджає акумулятор.

Для прийнятого значення струму зарядки падіння напруги на резисторі R3 одно 0,22 В. Саме ця напруга необхідно встановити на движку резистора R7 до монтажу в пристрої, подавши на його верхній (за схемою) висновок напруга 1,24 В від стабілізованого джерела живлення.

Режим кондиціонування заряджає акумулятор G1 повинен включатися автоматично, якщо напруга на ньому на початку зарядки не перевищує 2,5 В. З цією метою компаратор DA3.1 відслідковує напругу на G1 (через дільник – підлаштування резистор R11), і якщо воно менше 2,5 В, вихідний транзистор компаратора відкривається до насичення, поєднуючи із загальним проводом висновок 2 мікросхеми DA1 і включаючи тим самим джерело зразкового струму. Як і в попередньому випадку, до установки резистора R11 в пристрій на його верхній (за схемою) висновок подають калібрований напруга (але тепер – 2,5 В) і поворотом движка домагаються на ньому напруги 1,24 В Після включення джерела зразкового струму $I_{обр} = 1,4$ мА напруга на вході інвертується ОУ DA1.2 представляє собою алгебраїчну суму падінь напруги на резисторах R3 і з'єднаних паралельно R4, R6. Нехтуючи падінням напруги, створюваним струмом $I_{обр}$ на датчику струму R3, розрахуємо опір резистора R4 для загальноприйнятого значення струму кондиціонування $I_{конд} = 0,1 \cdot I_{зар}$:

$$R4 = (U_{R3} - I_{конд} \cdot R3) / I_{обр} = (0,22 - 0,1 \cdot 0,22) / 0,0014 = 141,4 \text{ Ом.}$$

Необхідний опір найпростіше підібрати підключенням паралельно R4 резистора R6 зазначеного на схемі номіналу.

Отже, зазначені на схемі опору токозадаючих резисторів забезпечують зарядку глибоко розрядженого акумулятора струмом не більше 100 мА, а при підвищенні напруги на ньому до 2,5 В – струмом 1 А.

До сих пір ми говорили про початкову стадію зарядки акумулятора. По її завершенні починає працювати ОУ DA1.1. Порівнюючи зразкове напруга на неінвертуючий вході до частини напруги, що знімається з движка резистора R10, він відкриває транзистор VT1 рівно настільки, щоб напруга на акумуляторі не перевищило заданий рівень 4,2 В. Для цього до установки в пристрій на верхній (за схемою) висновок резистора R10 подають напругу 4,2 в і встановлюють движок в положення, в якому напруга на ньому дорівнює 1,24 В.

Як зазначалося вище, завершувати зарядку літєвий акумулятор слід при певному значенні струму. В даному випадку воно вибрано рівним 95 мА, що відповідає приблизно 90% його ємності [2]. Індикатором струму зарядки служить світлодіод HL2, підключений до виходу компаратора DA3.2. Останній порівнює сигнал здавача струму R3 з зразковим напругою. На фінальній стадії зарядки цей сигнал дуже малий, і щоб виключити вплив параметрів компаратора і необхідність його підбору, в пристрій введений ОУ DA2.1. Зміною опору резистора R9 в охоплює його ланцюга ООС домагаються того, щоб компаратор спрацьовував при зарядному струмі 95 мА. З резисторами R8, R9 зображених на схемі номіналів яскравість світіння світлодіода HL2 при такому струмі знижується приблизно вдвічі, а коли він зменшується до 93 мА, індикатор гасне. Така поведінка світлодіода обумовлено виникненням «брязкоту» напруги на виході компаратора при його підході до точки вимкнення і спостерігається, якщо акумулятор підключений до зарядного ланцюга безпосередньо, минаючи контакти реле K1. Введення останнього дозволило не тільки усунути небажаний «брязкіт», але і реалізувати автоматичне відключення акумулятора по завершенні зарядки [106].

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.

Потім до пристрою підключають батарею з трьох акумуляторів і спостерігають, як після збільшення напруги на ній приблизно до 4 В ток зарядки починає зменшуватися. При його значенні, рівному 95 мА, яскравість світіння світлодіода HL2, як зазначалося, повинна знизитися вдвічі, а при 93 мА він повинен згаснути. Під час проходження зазначеного інтервалу зарядного струму буде чітко чути брязкіт контактів реле. Оскільки його дотактна група на цьому етапі комутує струм всього лише приблизно 5 мА (включає і вимикає HL3), її стан після такого випробування не погіршиться. При першій зарядці цей процес протікає досить повільно, проте якщо вимкнути пристрій і знову включити (із зарядженою батареєю), зменшення струму відбувається в лічені секунди і досягти потрібного поведінки світлодіода в зазначених межах зміни струму (підбором резистора R9) не складає труднощів. Як вказувалося, кінцева напруга на батареї встановлюють рівним 4,18 В підлаштування резистором R10.

Далі батарею під'єднують через контакти реле і перевіряють роботу пускового ланцюга, а також чіткість відключення акумулятора після закінчення зарядки. При цьому може знадобитися попередня короткочасна розрядка зарядженої батареї через резистор опором 5 ... 10 Ом.

На завершення налагодження до пристрою підключають Li-ion акумулятор і в процесі його зарядки перевіряють відповідність напруги (крім 2,5 В, зрозуміло) і зарядного струму встановленим значенням. Через деякий відмінності внутрішнього опору Li-ion і Ni-Cd акумуляторів може знадобитися повторне регулювання пристрою [107].

Пристрій зібрано на макетній платі розмірами 60x45 мм (друкована плата не розроблялася). Транзистор VT1 встановлений на тепловідвід з площею охолоджуючої поверхні близько 100 см². Діод 1N5822 замінимо будь-яким

іншим діодом Шотки з робочим струмом до 3 А. підлаштування резистори R7, R10, R11 - багатооборотні дротяні, наприклад, СП5-3. Конденсатор С5 - будь-який оксидний ємністю 6,8 ... 10 мкФ з номінальною напругою 10 ... 35 В. Замість КТ829А можна використовувати будь-який інший потужний складовою транзистор зі статичним коефіцієнтом передачі струму бази h21E 750 ... 1000.

У пристрої застосовано герконове реле РС55А з паспортом РС4.569.604 (нове позначення - РС4.569.600-16). Оскільки його робоча напруга значно менше 7 В, послідовно з обмоткою включений резистор R17. Можливе використання реле цього типу з паспортом РС4.569.603 (РС4.569.600-15). У цьому випадку опір резистора, що гасить надлишок напруги, слід зменшити до 43 Ом.

Як джерело зарядного струму можна використовувати мережевий адаптер, описаний в [1], встановивши його вихідна напруга рівним 7 В [108].

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 Моніторинг параметрів тягових акумуляторних батарей шахтних контактних-акумуляторних електровозів

7.1 Особливості акумуляторних батарей як елементів систем тягових електротехнічних комплексів шахтних електровозів

Загальновідомо, що ефективність функціонування і багато в чому залежна від цього процесу доцільність застосування тягових акумуляторних батарей (ТАБ) як джерела автономного живлення тягового електротехнічного комплексу (ТЕТК) двовісних електровозів визначається експлуатаційними властивостями та ціновими показниками типів батарей, що прогноуються до застосування [109]. У роботах авторів наукової школи професора Сінчука О.М. оцінена ефективність різних типів сучасних АБ стосовно умов шахтних контактних-акумуляторних видів електровозів зі структурами ТЕТК: IGBT перетворювач-асинхронні тягові двигуни [110]. Названі науковці визначили реалії та перспективи застосування тих чи інших типів АБ як джерел автономного живлення для заново створюваних вітчизняних видів шахтних контактних-акумуляторних електровозів. Разом із тим показано, і в черговий раз підкреслено, що у свою чергу тягові види АБ в тій чи іншій мірі мають великий розкид електричних і конструктивних параметрів і являють собою складний комплекс хімічних, експлуатаційних та інших зовнішніх випадкових факторів, що діють одночасно на властивості батареї та впливають один на одного. Разом із тим, у свою чергу, підкреслено, що кожна батарея, поряд із загальними, має конкретні, тільки їй притаманні властивості, що визначаються особливостями конструкції, фізичним станом акумуляторів і режимом їх експлуатації. Тому для достовірно реального аналізу експлуатаційних властивостей ТАБ того чи іншого типу необхідно мати в розпорядженні відповідну кількість статистичного матеріалу, накопиченого методами пасивного й активно-пасивного експериментів. У цьому випадку спостерігається природний прояв закономірностей протікання зарядних і розрядних процесів у ТАБ, які цікавлять дослідника, що досить важливо під час створення нових технічних

засобів й оцінки рівня ефективності того чи іншого виду ТЕТК та ефективності ТАБ.

Як відомо [111], основні параметри ТАБ, будучи функціями часу, одночасно є функціями багатьох інших факторів, які в конкретних ситуаціях носять стохастичний характер. До числа таких факторів в умовах експлуатації можна віднести: режим розряду, що визначається особливостями технологічного процесу та функціонування відповідного обладнання; режим заряду, що залежить від способу й типу зарядного пристрою, який визначає якість процесу регулювання основних електричних параметрів ТАБ (струму чи напруги), форму кривої випрямленого струму, фізичний стан батарей, що характеризується початковими (вага активної маси електродів) конструктивними параметрами акумуляторів, станом електродів та електроліту, кількістю циклів заряду-розряду (відпрацьованими ресурсом) та ін.

А значить, залежності, що виражають зміну в часі параметрів ТАБ при експлуатації, необхідно розглядати як випадкові функції, а оцінку ефективності функціонування ТАБ доцільно проводити за допомогою можливих характеристик. Показник ефективності повинен характеризувати систему, що розглядається, як єдине ціле, забезпечувати можливість отримання кількісної оцінки його залежності від заданих факторів з потрібною достовірністю, мати чітко окреслені межі області його зміни [111].

Оцінка обраного показника ефективності для тих чи інших умов у ході натурних випробувань здійснюється на основі експертних оцінок параметрів і характеристик ТАБ з урахуванням впливу основних виробничих факторів.

Враховуючи складність і тривалість натурних випробувань ТАБ, а головне в зазначеному варіанті досліджень – коли оплати експлуатації контактної-акумуляторних електровозів у шахтах немає, за метод оцінки ефективності можна прийняти дослідно-теоретичний [112]. В основу цього методу входять:

– змістовий опис задачі, уточнення ступеня й характеру залежності показника ефективності від характеристик окремих процесів експлуатації ТАБ та зовнішніх умов, встановлення узагальнених параметрів процесів експлуатації

ТАБ, визначення вимог щодо точності й достовірності шуканих оцінок: відбір релевантних факторів за апріорними даними;

– визначення умов випробувань за допомогою факторного планування й вибір відповідних методів оцінки шуканих характеристик на базі натурального експерименту й математичного моделювання;

– обґрунтування й вибір раціонального складу та структури математичних моделей;

– планування й організація натурних експериментів та обґрунтування їх об'єму;

– відпрацювання й калібрування математичних моделей за результатами натурних експериментів;

– оцінка показників комплексу ефективності того чи іншого виду ТАБ.

Дослідно-теоретичний метод при реальності його проведення в усьому комплексі складових дозволяє оцінювати як окремі характеристики об'єктів у системі, так і характеристики системи в цілому у вигляді показника ефективності в усьому діапазоні його зміни. При вказаному методі кількість точок у факторному просторі, параметри й характеристики значимих факторів обираються з умов отримання чи підтвердження апріорно обраної шуканої залежності, для чого використовується апарат факторного планування.

Найважливішою задачею, що виникає під час створення нових технічних засобів експлуатації ТАБ, до яких відносяться зарядні й зарядно-розрядні пристрої, засоби моніторингу, контролю й захисту від недопустимих режимів роботи ТЕТК шахтних електровозів, є вивчення й математичний опис основних експлуатаційних (електричних, енергетичних і надійнісних) характеристик акумуляторних батарей. Це забезпечить можливість отримання достатньо універсальних, наочних і простих математичних моделей, що дозволяють оцінювати експлуатаційні властивості й режими функціонування АБ, контролювати (здійснювати моніторинг) стан параметрів, прогнозувати їх у різних виробничих ситуаціях, що характеризуються безліччю можливих станів.

У процесі експлуатаційних зарядів і розрядів ТАБ на характеристиках, що виражають залежності за часом напруги $U = f_1(t)$ та струму $I = f_2(t)$, можна виділити два характерних режими: 1) комутаційний; 2) власне заряд-розряд. Комутаційний режим має місце в моменти підключення (відключення) батарей до навантаження чи зарядного пристрою, а також під час чергування імпульсів зарядного й розрядного струму й пауз при дискретному способі заряду й фактичному розряді. Перехідні процеси, що виникають при цьому, характеризуються швидким зростанням спадання струмів і напруг. Другий режим у пасивному варіанті відповідає наявності у зовнішньому замкнутому ланцюзі ТАБ постійного за величиною навантаження, що забезпечується розрядним пристроєм, чи джерела випрямленої напруги (розрядного пристрою). Перехідні процеси в ТАБ в такому випадку протікають повільно, характеризуються великими постійними часу й можуть розглядатися як квазістаціонарні[113].

Під час роботи тягових батарей в активному режимі експлуатаційного розряду, як правило, мають місце випадкові чергування перехідних процесів, які протікають швидко й повільно. Конкретні реалізації натурних зарядних процесів при природному функціонуванні таких ТАБ містить ділянки з параметрами, що плавно змінюються, наприклад, рух шахтного електровоза зі швидкістю, яка встановилася, й ділянки з параметрами процесів, які швидко змінюються, наприклад, при маневрових роботах тих же електровозів. У випадку, що розглядається, режим розряду в цілому характеризується складними залежностями електричних й енергетичних параметрів тягових акумуляторних батарей від характеристик траси руху, особливостей рухомого складу, типу електропривода електровоза, людського фактора – суб'єктивних якостей машиніста та ін. Указані залежності носять випадковий характер, тому доцільно виділити з них показну, яка найбільш повно характеризує процес експлуатаційного розряду. Такою узагальненою характеристикою може служити «умовно – експлуатаційний розрядний режим (УЕРР)», під яким розуміється розрахунковий режим розряду ТАБ, еквівалентний за струмовими

навантаженнями, й величина розрядної ємності, статистично визначена для різних умов натурних режимів розряду.

У межах поставленої укороченої задачі аналізу властивостей ТАБ з метою спрощення математичний опис експлуатаційних характеристик ТАБ доцільно розділити на етапи отримання наступних часткових математичних моделей:

- моделі, що характеризують властивості АБ на ділянці, обмеженій часом протікання процесів поляризації в акумуляторах $Ic \leq t \leq 300c$, для синтезу дискретних підсистем моніторингу;
- моделі АБ як об'єкта керування, яка у складі ТЕТК описує поведінку АБ на ділянці, обмеженій часом регулювання режимів при використанні імпульсних перетворювачів $0 \leq t \leq Ic$, для синтезу підсистем заряду-розряду неперервної дії;
- моделі АБ на ділянці часу від 0 до $t_3(t_p)$ при заданому діапазоні зміни струмів (напруги) заряду-розряду для синтезу електричної схеми заміщення;
- моделей, що описують електричні й енергетичні характеристики АБ в процесах експлуатаційних зарядів і розрядів для ланцюгів їх оцінки й прогнозування;
- моделей, що описують їх надійнісні характеристики й функції напрацьованого ресурсу з урахуванням процесу природного старіння, для оцінки й прогнозування технічного стану батарей та остаточного ресурсу.

7.2 Характеристики тягових акумуляторних батарей

Як відомо [114], теоретичне дослідження, синтез і налаштування параметрів систем, що містять АБ, спрощуються за наявності їх математичної моделі. У загальному випадку математична модель АБ повинна із заданою точністю відтворювати динамічні характеристики в широкому діапазоні зміни зовнішніх умов та одночасно нести смислову інформацію, хоча б на рівні аналогій, про модельовані фізико-хімічні процеси.

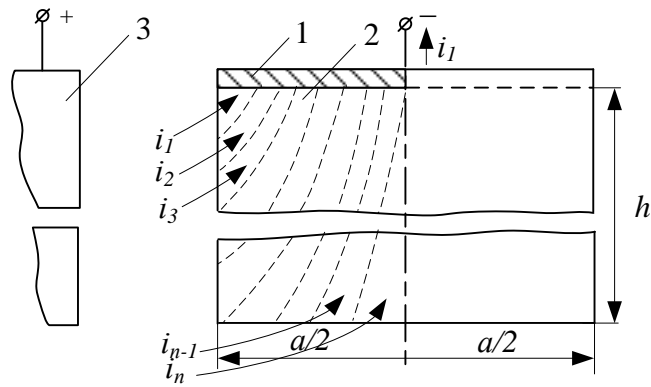


Рисунок 7.1 – Схема заміщення електронної пластини акумулятора

Реальна форма залежності струму чи ЕРС від часу в діапазоні $1c \leq t \leq 300c$ істотно відрізняються від експоненти [115]. На початку перехідного процесу вона крутіша за експоненту, а потім поступово «вирівнюється», і з певного моменту часу стає пологішою за будь-яку експоненту з наперед заданою постійною часу. Залежності подібного виду, характерні для дифузійних процесів, описуються в рівнянні виду:

$$Y = A / \sqrt{t} , \quad (7.1)$$

де Y – досліджуваний параметр (напруга чи струм); A – постійний коефіцієнт; t – поточне значення часу.

Однак вираз (7.1) не відображає наочно фізичної сутності процесів, а коефіцієнт A аналітично можна виразити лише для гладкого електрода зі строго постійним фазовим складом, що неможливо зробити для реального багатокомпонентного заряду. Крім того, ця модель, будучи рішенням відомого диференційного рівняння дифузії, дає спотворені результати при малих значеннях часу t . Наприклад, початковий момент заряду, розряду чи паузи, коли $t = 0$, величина вихідного параметра (струму, напруги) завжди має кінцеве значення, що протирічить (7.1).

Одним із варіантів отримання прийнятної математичної моделі АБ може служити розгляд процесів, які протікають при заряді чи розряді на одній електродній пластині (рис. 7.1), яка представляється як об'ємний елемент із розподіленими електричними параметрами: питомим опором ρ і питомою

ємністю q . Параметр ρ характеризує процеси, пов'язані з перетворенням електричної енергії заряду-розряду в тепло, а параметр q моделює окислювально-відновлювальні реакції, що змінюють електричний потенціал.

Процеси заряду-розряду в поверхневих шарах пористого електрода протікають більш активно, ніж у глибинах, що мають більший електричний опір. Нерівномірність розподілу потенційного й струмового полів за товщиною й висотою пористого електрода підтверджена експериментально [116], тому результуючий струм i , що протікає через досліджувану пластину, буде дорівнювати безкінечній сумі безкінечно малих елементарних струмів i_1, i_2, \dots, i_n , що протікають по окремих шарах.

У ході математичного опису АБ як елемента системи керування ТЕТК основний інтерес викликають залежності від часу результуючих значень струму й напруги, розподіл цих параметрів за об'ємом електрода не має суттєвого значення. Тому безкінечною сумою безкінечно малих струмів, не вносячи помітної похибки, можна замінити кінцевою сумою кінцевих струмів, що протікають у шарах електродів кінцевої товщини, а взаємний зв'язок між шарами розглядати як потенціальні збіги.

Електричну схему заміщення акумулятора можна отримати на основі подання процесу накопичення потенціалу як заряду конденсатора, що імітує відповідний шар електрода (рис. 7.1), а зв'язок між шарами – як резистивне з'єднання (рис. 7.2). Резистори $R_{01} - R_{cn}$ імітують внутрішній (міжшаровий) опір АБ, резистори $R_{11} - R_{1n}$ – зовнішні витікання й саморозряд акумуляторів. Заряд конденсаторів під час подачі напруги U відбувається зі швидкостями, зворотнопропорційними їх ємностям $C_1 - C_n$ та опорам відповідних резисторів.

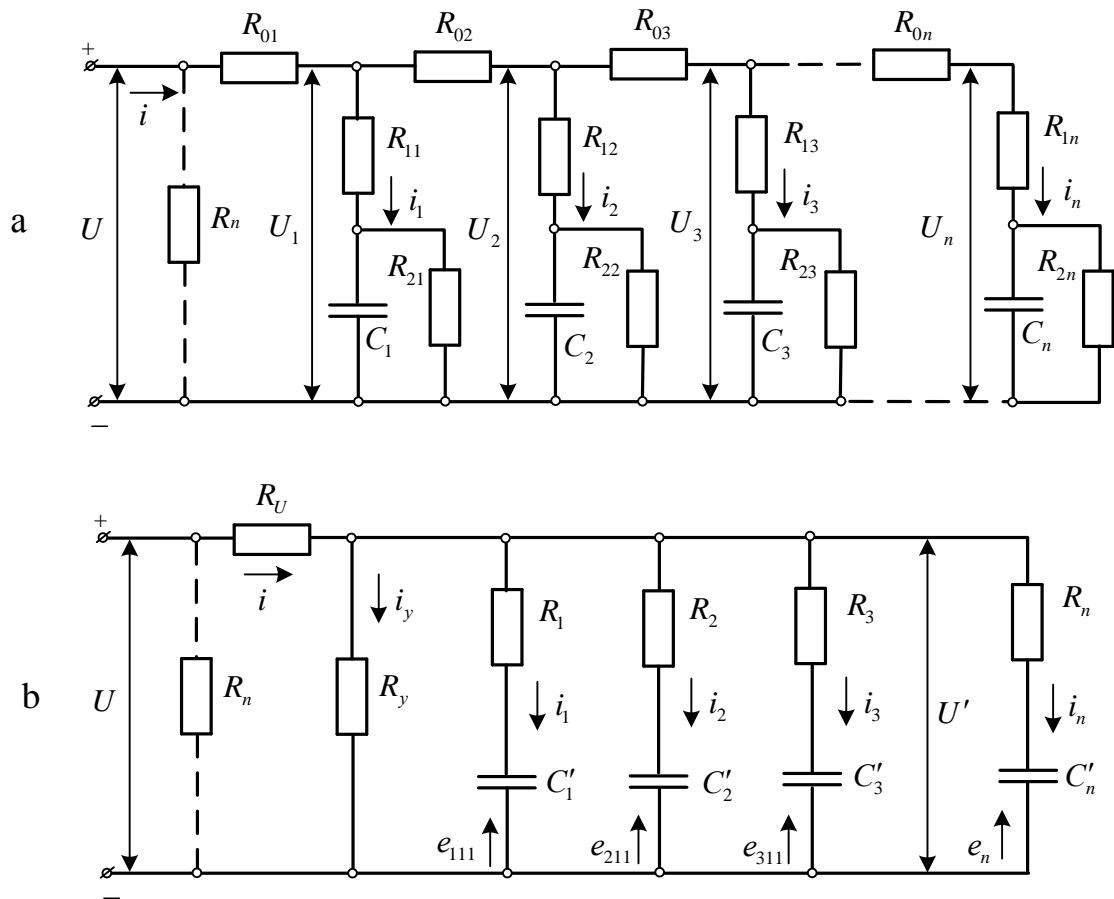


Рисунок 7.2 – Електричні схеми заміщення тягових акумуляторів

Після відключення від АБ напруги U починається вирівнювання напруг на ємностях елементарних шарів $C_1 - C_n$ аналогічно вирівнюванню потенціального поля на електроді. Режим розряду ТАБ імітується підключенням замість U зовнішнього опору навантаження, показаного пунктиром на рис. 7.3.

Для отримання схеми заміщення, що складається на n однакових за формою ланцюгів, що відповідають розрахунковим елементарним шарам АБ, у режимі заряду можна скласти n пар рівнянь виду:

$$U_k(p) = U(p) - R_{01} \sum_{i=1}^n i_i(p) - R_{02} \sum_{i=1}^n i_i - \dots \quad (7.2)$$

$$i_k(p) = U_k(p) \frac{T_k p + 1}{\alpha_k (K_k T_k p + 1)} \quad (7.3)$$

й рівняння

$$i(p) = \sum_{i=1}^n i_i(p), \quad (7.4)$$

де U – напруга заряду, В; i – результуючий зарядний струм, А; U_k, i_k – напруга й струм на довільному k -тому ланцюгу; $T_k = R_k C_k$ – постійна часу k -того ланцюга, с; $\alpha_k = R_{1k} + R_{2k}$ – омичний опір k -того ланцюга, Ом; $K_k = R_{1k} / R_{1k} + R_{2k}$ – передатний коефіцієнт k -того ланцюга.

У результаті сумісного рішення $2n+1$ рівнянь (7.2) – (7.4) отримаємо передатну функцію:

$$W(p) = i(p) / U(p) = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n \quad (7.5)$$

Вираз (6.5), коефіцієнти якого знаходяться за відомими параметрами схеми заміщення, є операторним зображенням електричної провідності АБ.

Однак передатну функцію (7.5) можна отримати, використовуючи більш просту схему заміщення (рис.7.2), для якої система вихідних рівнянь буде такою:

$$W(p) = U'(p) \cdot T_k p / R_k (T_k p - 1) \quad (7.6)$$

$$i_y(p) = U'(p) / R_y \quad (7.7)$$

$$i(p) = i_y(p) + \sum_{i=1}^n i_k(p) \quad (7.8)$$

$$U'(p) = U(p) - R \cdot i(p), \quad (7.9)$$

де U' – напруга на паралельних ланцюгах, В; R_k – опір k -того ланцюга, Ом; $T_k = R_k C'_k$ – постійна часу, с; R_y – опір ланцюга витікання й саморозряду, Ом; i_y – струм витікання, А.

У процесі заряду конденсаторів C'_1, C'_2, \dots, C'_n напруги на них від ненульових початкових значень, що дорівнюють $e_{1N}, e_{2N}, \dots, e_{nN}$, експоненціально зростає до рівнів e_1, e_2, \dots, e_n . Причому в ланцюгах із меншою постійною часу наростання відбувається швидше й до більшого рівня. Тому на момент закінчення зарядного імпульсу вказані напруги виявляються рівними за величиною.

У процесі паузи при відключенні U струм i миттєво стає рівним нулю, а $U = U'$. Конденсатори C'_1, C'_2, \dots, C'_n починають розряджатися на R_y , відбувається також перерозподіл їх заряду через $R_1 - R_f$, і їх напруги намагаються вирівнюватися. У цьому випадку стає можливим зміною напруги на АБ апроксимувати сумою експонент із постійними часу T_1, T_2, \dots, T_n , в число яких входять як поляризаційні складові, так і складові від окислювально-відновлювальних реакцій. Саморозряд АБ відбувається значно повільніше, ніж спадання напруги поляризації, тому прогрес деполіаризації при відключенні U сприймається (в експоненті) як зниження напруги не до нуля, а до рівня, відповідного фактичному ступеню зарядженості АБ в момент припинення заряду.

Розглянуті закономірності дозволяють представити еквівалентну структуру акумулятора в режимах заряду й паузи, що відповідає схемі заміщення (рис. 7.2, б) схемами, зображеними на рис. 7.3.

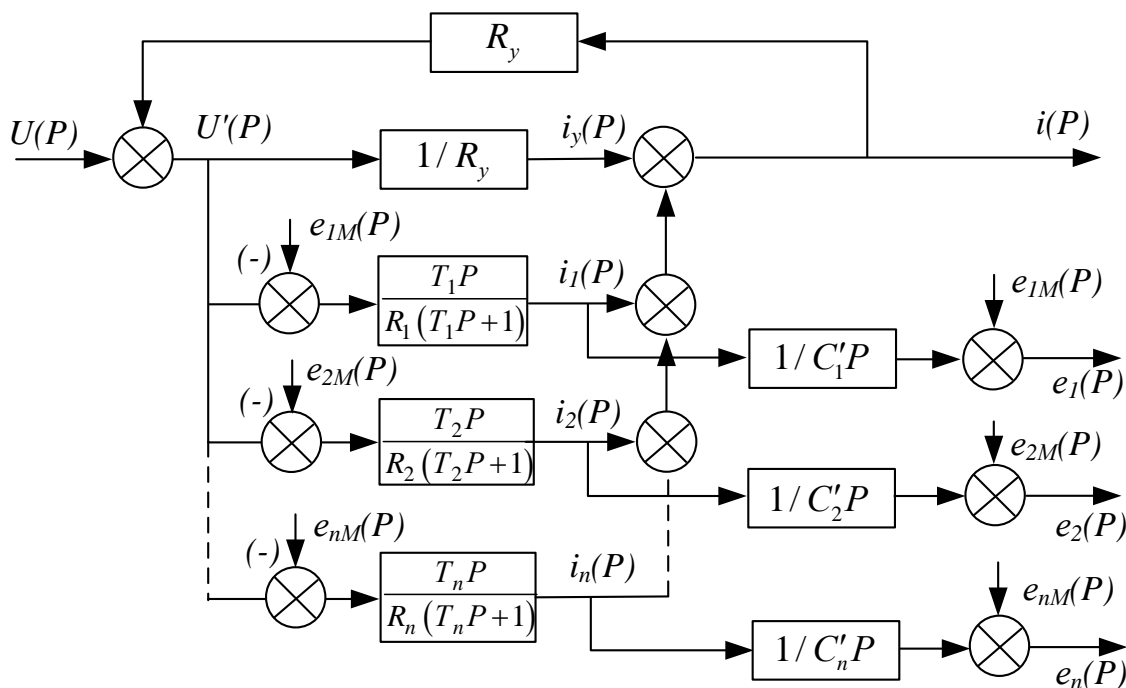


Рисунок 7.3 – Структура акумулятора в режимі заряду-розряду

Отже, у загальному випадку струм при включенні АБ на заряд чи розряд і напруга на її виводах у режимі паузи можна апроксимувати сумою експоненціальних кривих із різними початковими значеннями й постійними часу.

Це дозволяє експериментальні залежності $U = f(t)$ й $i = f(t)$ розкласти на експоненціальні складові й за ними визначати параметри математичної моделі тягової батареї.

Відповідно до обраної тактики будови й відповідного їй режиму функціонування шахтних контактено-акумуляторних електровозів режим функціонування, тобто живлення ТАД від ТАБ, є короткочасним – лише під час навантажувально-розвантажувальних операцій, а під час живлення від тягової контактної мережі відбувається обмежений у часі процес її заряду, викликає інтерес поведінка батареї на обмеженій ділянці часу. При цьому можна допустити, що параметри окремих акумуляторів і батареї в цілому, що є у вказаних системах ТЕТК об'єктом керування, за час перехідного процесу, викликаного подачею на вхід одиничного або ступінчастого впливу, практично залишаються постійними для конкретних рівнів струму заряду-розряду ступеня зарядженості ТАБ.

В основу побудови математичної моделі ТАБ покладена електрична схема заміщення акумуляторів (рис 7.4), наведена в [117]. Батарея (акумулятор) вважається повністю зарядженою (ступінь зарядженості $C = 100\%$), якщо їй повідомлена зарядна ємність, що дорівнює $1,5 C_n$ (C_n – номінальна ємність). Ступінь зарядженості $C = 0\%$, якщо АЦП розряджений струмом п'ятигодинного режиму до напруги, яка дорівнює 1 В на акумулятор.

Електричні процеси в схемі заміщення акумулятора можна описати системою рівнянь:

$$\begin{aligned} u_3 &= L_0 di_3 / dt + r_0 i_3 + u_c, \\ u_c &= E_0 + 1 / C_n \cdot \int_0^t i_c dt \\ i_n &= (u_c - E_0) / r_n, \\ i_3 &= i_n + i_c, \end{aligned} \tag{7.10}$$

де u_3 – напруга заряду; L_0, r_0 – індуктивність й активний опір акумулятора; i_3, i_c, i_n – струми заряду і внутрішнього контура в ланцюгах конденсатора та ЕРС

відповідно; u_c – напруга на внутрішньому контурі акумулятора; E_0 – ЕРС акумулятора (напруга розімкненого ланцюга) в момент підключення його на заряд; C_n, r_n – ємність та опір поляризації електродів акумулятора.

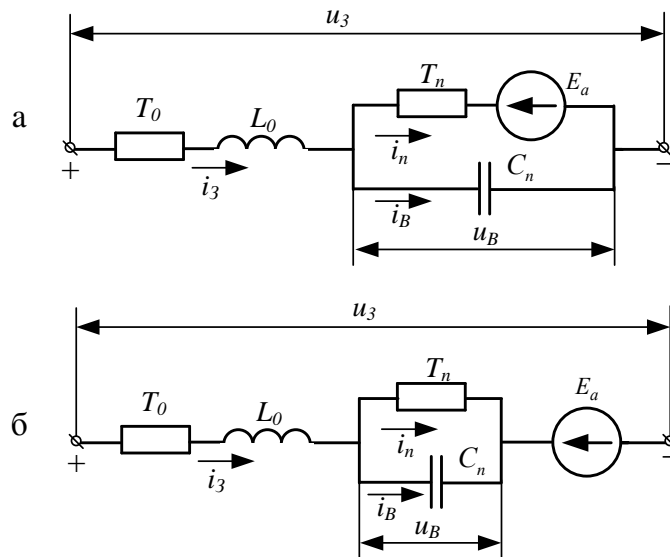


Рисунок 7.4 – Електрична схема заміщення тягового акумулятора

Рішення системи (7.10) в операторній формі запису буде мати вигляд:

$$U_3(p) = [(T_0 p + 1)r_0 + r_n / (T_n p + 1)] I(p) + E_0(p) \quad (7.11)$$

де U_3 – напруга та струм заряду; $T_0 = L_0 / r_0$ – постійна часу, обумовлена індуктивністю акумулятора; $T_n = r_n C_n$ – постійна часу поляризації.

Передатна функція ТАБ на підставі (7.5) запишеться

$$W_a(p) = \frac{I_3(p)}{\Delta U_a(p)} = \frac{K_a (T_n p + 1)}{T'^2 p^2 + T p + 1}, \quad (7.12)$$

де $\Delta U_a(p) = U_3(p) - E_0(p)$; $K_a = 1 / (r_0 + r_n)$ – передатний коефіцієнт

акумулятора; $T = \frac{r_0}{r_0 + r_n} (T_0 + T_n)$, $T' = \sqrt{\frac{r_0}{r_0 + r_n} T_0 \cdot T_n}$ – постійні часу акумулятора.

Рівняння (7.12) при тих же допущеннях застосовується і для іншого варіанту схеми заміщення, зображеного на рис.7.4, б.

Структурні схеми акумулятора для режиму заряду й розряду, що відповідають моделі (7.12), наведені на рис. 7.5.

Використовуюючи отримані структури, можна синтезувати математичну модель батареї, що складається з довільного числа n акумуляторів, які мають різні параметри r_{ol} , L_{ol} , C_{ni} , r_{il} , E_{oi} . При найбільш поширеному на практиці послідовному з'єднанні акумулятора входом першого з них є напруга, а виходом – струм, загальний для інших акумуляторів і такий, що подається на їх вхід. Тому на підставі (7.12) структурну схему батареї можна ілюструвати рис. 7.6, а узагальнену передатну функцію виразити рівнянням:

$$W_B(p) = \frac{I_3(p)}{U_B(p)} = \frac{K_B \prod_{i=1}^n (T_{ni}p + 1)}{1 / \sum_{i=1}^n \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \sum_{i=1}^n \left[(T'^2 p^2 + T_i p + 1) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (T_{nk} p + 1) K_{ak} \right]}, \quad (7.13)$$

де $K_B = 1 / \sum_{i=1}^n (r_{ol} + r_{ni}) = 1 / (R_0 + R_n)$ – передатний коефіцієнт батареї;

$R_0 = \sum_{i=1}^n r_{ol}, R_n = \sum_{i=1}^n r_{ni}$ – омичний і поляризаційний опори батареї;

$\Delta U_5(p) = U_3(p) - \sum_{i=1}^n E_{ol}(p); \sum_{i=1}^n E_{ol}(p) = E_3(p)$ – приріст напруги й ЕРС на батареї.

Узагальнену модель (7.13) можна використовувати для дослідження процесів, що протікають у натурній батареї, з урахуванням індивідуальних характеристик окремих акумуляторів. Враховуючи, що у ході синтезу зарядно-розрядних режимів інтерес викликають перехідні процеси в батареї в цілому, доцільно спростити її математичну модель. З цією метою батарею слід розглядати як систему акумуляторів із рівними, усередненими параметрами, тобто як ідеальну. Тоді (7.13) можна представити виразом:

$$W_B(p) = \frac{I_3(p)}{\Delta U_B(p)} = \frac{K_B (T_n p + 1)}{T'^2 p^2 + T p + 1}, \quad (7.14)$$

де $K_B = K_a / n$, а постійні часу T' , T , T_n – дорівнюють відповідним постійним часу одного усередненого акумулятора.

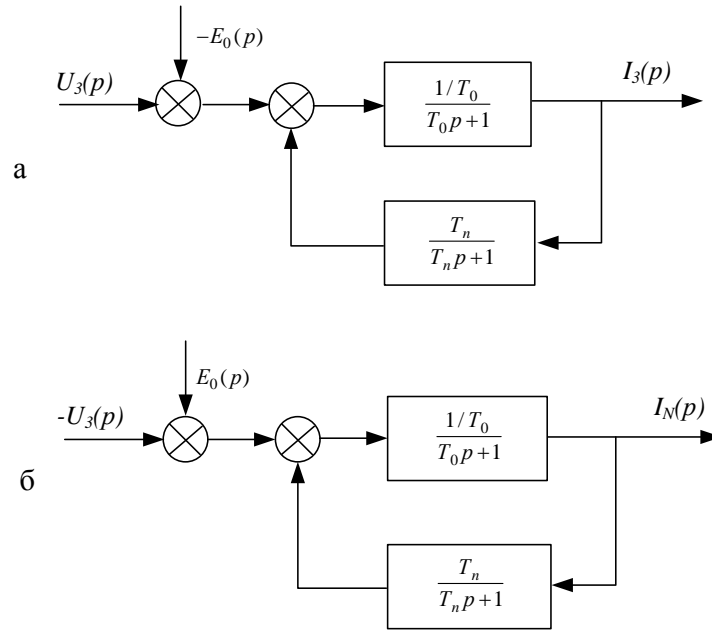


Рисунок 7.5 – Структурні схеми тягового акумулятора в режимі заряду-розряду

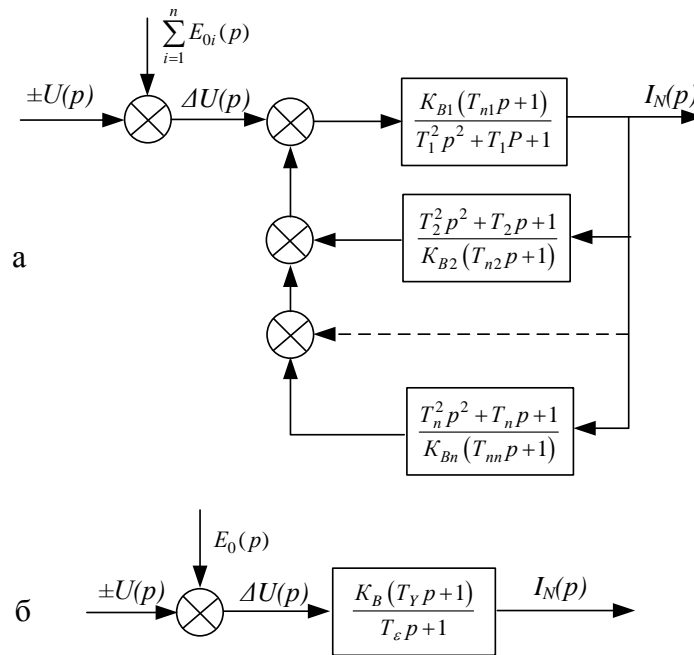


Рисунок 7.6 – Структура схеми акумуляторної батареї

Аналогічно можна довести, що у ході розряду батареї на імпульсний перетворювач, що працює в режимі інвертора, узагальнена і спрощена її моделі будуть ідентичні відповідним моделям у режимі заряду (7.13) і (7.14). При цьому у виразах передатних функцій замість $-E_B, +U_3$ при заряді слід підставити $+E_B, -U_n$ (напруга на вході інвертора) при розряді.

Модель (7.13) можна звести до більш простого виразу, якщо знехтувати індуктивністю тягових акумуляторів, яка, як відомо, складає $(0,7+0,3) \cdot 10^{-6}$ Гн для діапазону ємностей від 100 до 500 А·Г:

$$W_B(p) = K_B (T_n p + 1) / (T_B p + 1) \quad (7.15)$$

або

$$W_B(p) = K_B (\alpha_B T_B p + 1) / (T_B p + 1), \quad (7.16)$$

де $K_B = 1 / (R_0 + R_n)$ – передатний коефіцієнт батареї;

$T_i = R_n C_n, T_B = \frac{R_0}{R_0 + R_n} T_n = \frac{T_n}{\alpha_B}$ – постійні часу контуру поляризації й перехідного

процесу батареї; R_0, R_n – омичний і поляризаційний опори батареї;

$\alpha_B = \frac{T_n}{T_B} = \frac{R_0 + R_n}{R_0}$ – коефіцієнт кратності постійних часу, що характеризують

ступінь диференціювання батареєю вхідного впливу.

Структурна схема спрощеної моделі батареї наведена на рис. 7.6, б. Первинній функції (7.15) або (7.16) відповідає перехідна функція батареї

$$i_B(t) = \Delta U_B K_B [1 + (\alpha_B - 1) \exp(-t / T_B)] \quad (7.17)$$

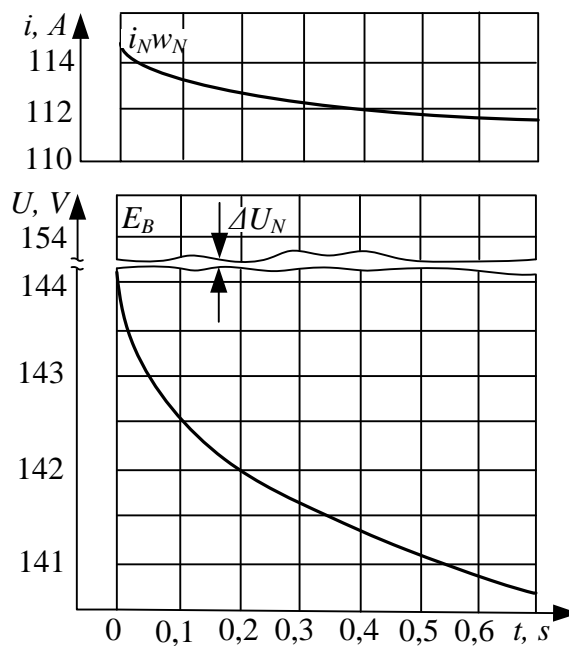


Рисунок 7.7 – Графік процесів протікання струму $i_n(t)$ й напруги $U_n(t)$ для ТАБ

Таким чином, конкретна ТАБ при певних початкових умовах на заданому інтервалі часу (до 1 с) апроксимується ланкою загального вигляду першого порядку диференціюючої дії з постійними параметрами. Разом із тим при різних початкових умовах параметри моделі (7.17) визначаються характером зміни внутрішнього опору батареї. Під початковою умовою розуміється ступінь зарядженості ТАБ, кількість, тип і технічний стан акумуляторів, що характеризується числом експлуатаційних зарядно-розрядних циклів, якістю електроліту, внутрішнім опором, температурою та іншими факторами.

Ефект диференціювання, який має цей об'єкт, визначається тим, що має нерівність

$$T_n \succ T_B \quad T_n \succ T_{\text{або}} \quad \alpha_B \succ 1, \quad (7.18)$$

у відповідності з яким при подачі на вхід ТАБ ступінчастого впливу в початковий момент часу виникає стрибок струму

$$i_n(0) = K_B \alpha_B \Delta U_B \quad (7.19)$$

і потім плавно убуває з постійною часу T_B до значення

$$T_B(\infty) = i_{B \text{ st}} = K_B \Delta U_B \quad (7.20)$$

Процеси протікання струму $i_n(t)$ й напруги $U_n(t)$, приклад яких для конкретної батареї наведений на рис. 7.7, мають специфічні особливості, що відрізняють ТАБ як об'єкт від загальновідомих. Зокрема у момент часу $t = 0$, тобто при включенні батареї на навантаження R_n , струм розряду досягає свого максимального значення, змінюючись практично миттєво від 0 до $i_n = i_{n \text{ max}} = i_n(0)$, відповідно напруга на омичному опорі ТАБ зменшиться стрибком від E_B до $U_n(0_m)$, що свідчить про допустимість заміни моделі (7.13) спрощеною (7.16).

Подальша зміна струму й напруги обумовлена перехідним процесом у контурі E, r_n, C_n (рис. 7.7) і розміром батареї.

З метою збільшення точності обробки осцилограм за основні прийняті криві зміни напруги на батареї, що спрощує реалізацію схеми виміру (бо записується

тільки приріст напруги й дозволяє збільшити масштаб осцилограми за ординатою). При цьому в схему виміру вводиться джерело опорної напруги, що компенсує E_B перед дослідом, і точний прилад для виміру напруги розімкненого ланцюга (ЕРС) батареї.

Отримані експериментально криві розгону обробляються шляхом апроксимації на заданій ділянці часу розрахунковими кривими, що являють собою часові характеристики еквівалентної системи «батарея-навантаження», структурна схема якої (рис 7.8) являє собою дві послідовно з'єднаних ланки (батарея й навантаження), охоплених одиничним від'ємним зворотнім зв'язком.

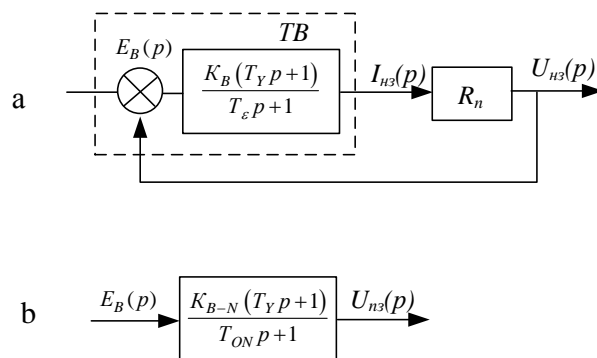


Рисунок 7.8 – Структурна схема акумуляторної батареї

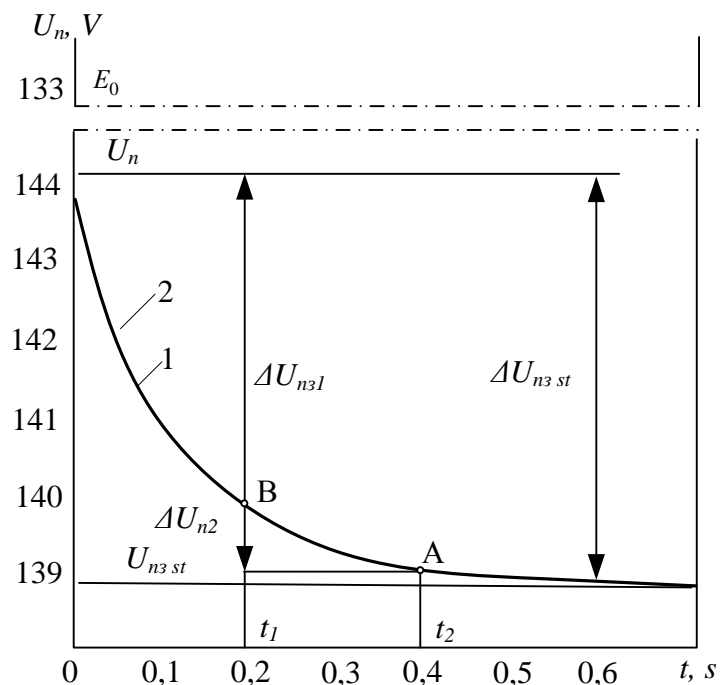


Рисунок 7.9 – Експериментальні криві напруги й струму акумуляторної батареї при заряді-розряді

Передатна функція, що відповідає структурі (рис.7.8), визначається виразом

$$W_{B-H}(p) = \frac{U_N(p)}{E_B(p)} = \frac{K_B R_N (T_n p + 1) / (T_B p + 1)}{i + K_B R_N (T p + 1) / (T_B p + 1)} =$$

$$= \frac{K_B R_N (T_n p + 1) / (1 + K R_n)}{\frac{K_B R_N T_n + T_B}{1 + K_B R_N} p + 1} = \frac{K_{B-N} (T_n p + 1)}{T_{ON} p + 1} \quad (7.21)$$

або

$$W_{B-N}(p) = K_{B-N} \frac{\alpha T_{ON} p + 1}{T_{ON} p + 1}, \quad (7.22)$$

де $U_{ES}(p)$ – операторне зображення напруги навантаження еквівалентної системи;

$K_{B-N} = \frac{K_B R_N}{1 + K_B R_N} = \frac{U_{ES ST}}{E_B}$ – передатний коефіцієнт еквівалентної системи; $U_{ES ST}$ –

значення напруги еквівалентної системи, яке установилося; $\alpha = \frac{T_n}{T_{ON}} = \frac{U_N(0_+)}{U_{ES ST}}$ –

коефіцієнт форсування; $T_{ON} = \frac{K_B R_N T_n + T_B}{1 + K_B R_N}$ – постійна часу перехідного процесу

системи.

З урахуванням (7.21) і (6.22) можна записати:

$$K_{B-N} = \frac{R_N}{R_0 + R_N + R_B}, \quad T_{ON} = \frac{R_0 + R_n}{R_0 + R_N + R_n} T_n = \frac{T_n}{\alpha}, \quad \alpha = \frac{R_0 + R_N + R_n}{R_0 + R_N} \quad (7.23)$$

Передатній функції (7.21) відповідає структура, зображена на рис. 7.8. Перехідний процес у системі, що розглядається, згідно (7.23), опишеться рівнянням

$$u_{ES}(t) = K_{B-N} E_c \left[1 + (\alpha - 1) \exp(-t / T_{ON}) \right]. \quad (7.24)$$

Тоді напруга на батареї еквівалентної системи буде визначатися:

$$u_{EB}(t) = \begin{cases} E_B & \text{at } t < 0 \\ u_{ES}(t) & \text{at } t \geq 0 \end{cases} \quad (6.25)$$

Порівнюючи співвідношення рівнянь (7.23), (7.24) з (7.25), отримаємо вираз для визначення параметрів через параметри еквівалентної системи:

$$K_B = \frac{K_{B-N}}{R_N(1 - K_{B-N})}, \quad \alpha_B = \alpha + \frac{R_N}{R_0}(\alpha - 1), \quad T_B = \frac{\alpha}{\alpha_B} T_{ON}, \quad (7.26)$$

$$T_n = \alpha T_{ON} = \alpha_B T_B$$

У випадку, що розглядається, інтерес викликає тільки початкова ділянка кривої перехідного процесу, виходячи з умов обмеження часу регулювання заряду-розряду в межах 0,3+0,5 с.

Результати дослідження тягових батарей, у яких максимальне відхилення параметрів функції струму від їх середніх значень не перевищує для K_B 2%, для T_B, T_n 7% , показують, що зі збільшенням числа акумуляторів вплив значення струму на значення параметрів батареї знижується. Це можна пояснити тим, що подані батареї являють собою достатньо велику сукупність акумуляторів, характеристики яких є випадковими величинами, що підкоряються нормальному закону розподілу. Тому батарею в цілому можна представити як сукупності усереднених акумуляторів або як певний абстрактний акумулятор с усередненими електричними параметрами, які на відрізку часу, що розглядається, змінюються і практично не залежать від значення струму [118].

Значення параметрів досліджених батарей як об'єкта керування в тій чи іншій мірі визначається ступенем зарядженості й технічним станом. Залежності від ступеня зарядженості параметрів T_B, T_n має більш закономірний характер, ніж K_B , значення котрого в одних випадках змінюється на кілька процентів, а в інших – у 2 рази і більше. Указані параметри для зарядженої батареї мають тенденцію до збільшення в порівнянні з розрядженими, особливо вираженої для батарей, що зазнали більшого числа експлуатаційних зарядно-розрядних циклів. Параметр α_B для заряджених ТАБ має менше значення, ніж для розрядженої.

Значення передатного коефіцієнта суттєво залежить від числа акумуляторів у батареї, а залежність постійних часу T_B, T_n і α_B від цього фактора виражена менш значимо. В усіх випадках постійна часу поляризації більше постійної часу батареї ($T_B < T_n$), що вказує на наявність афекту диференціювання об'єктом вхідних збурень.

На підставі викладеного можна в черговий раз заключити, що ТАБ будь-якого типу чи виду являє собою складну динамічну систему зі змінними параметрами, однак як об'єкт керування на заданому інтервалі часу вона може бути апроксимована ланкою загального вигляду першого порядку диференціюючої дії, параметри якої постійні й визначаються ступенем зарядженості, рівнем струму, типом, числом і технічним станом акумуляторів. Залежність досліджуваних параметрів від струму зменшується із збільшенням числа акумуляторів і для ТАБ шахтних електровозів практично відсутня [119].

7.3 Аналіз можливих варіантів схмотехнічних рішень підсистем моніторингу стану тягових акумуляторних батарей шахтних контактних акумуляторних електровозів

Як відмічено в розділі 1 цієї дисертаційної роботи, сучасні тягові системи й комплекси промислових, і особливо шахтних, видів електровозів повинні суміщати програмно-апаратні засоби, що дозволяють значно скоротити кількість складових ТЕТК. У поданій системі контролю й керування апаратна частина виконує функцію виконавчих механізмів, тоді як програмний продукт, завантажений у мікроконтролери системи керування, відповідає за вимірювання, обробку й аналіз інформації, що надходить. На підставі отриманих та оброблених даних приймається рішення про зміну режиму функціонування тягової акумуляторної батареї.

Основними складовими підсистеми контролю стану елементів ТАБ є:

- контроль рівня напруги на елементах;
- контроль значення струму силового ланцюга.

Вимірювання напруг акумуляторів літій-іонної батареї необхідно проводити з точністю не менше $\pm 0,5\%$ від діапазону. Існує ряд схмотехнічних рішень, що дозволяють проводити вимірювання напруг послідовного ланцюга. Принципова відмінність цих рішень полягає в точності вимірювання напруг, акумуляторів, способу й складності схмотехнічної реалізації.

Метод ланцюжка резистивних дільників. Входи аналого-цифрових перетворювачів у структурах мікроконтролерів мультиплексовані й не мають гальванічної розв'язки, тобто вимірювання напруг на всіх каналах проводиться відносно загального земляного виводу. Опорна напруга аналого-цифрового перетворювача мікроконтролерів, як правило, не перевищує 5 В. Таким чином, для обчислення напруги акумуляторів, послідовно з'єднаних у батарею (за відсутності гальванічної розв'язки), потрібно привести напругу на виходах акумуляторів до напруги U_n , яка не перевищує опорну величину (рис. 7.10), в іншому випадку результат вимірювання виявиться невірним або призведе до виходу з ладу вимірювального обладнання. Подана напруга U_n назвемо «приведеною напругою акумулятора».

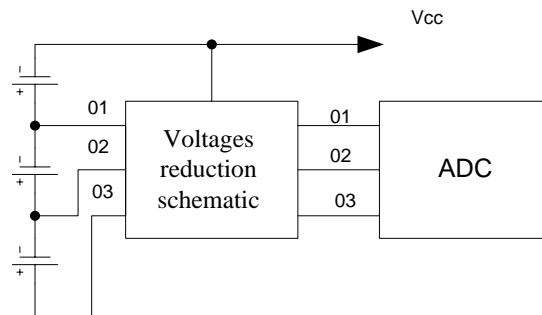


Рисунок 7.10 – Структура комплексу вимірювання напруг акумуляторів способом приведення напруг

Спосіб вимірювання напруги акумуляторів батареї, що розглядається, полягає в побудові схеми ділення, таким чином, щоб напруга на позитивному виводі n -ого акумулятора відносно загального виводу обчислювалася як добуток напруги, виміреної на відповідному виводі дільника, й номера акумулятора:

$$U_{ANn}^{gen} = n \cdot U_{ANn}, \quad (7.27)$$

де U_{ANn}^{gen} напруга на позитивному виводі n -ого акумулятора відносно загального виводу V_{cc} ; n номер акумулятора; U_{ANn} значення напруги на відповідному виводі подільника.

Схемотехнічна реалізація подільника наведена на рис. 7.11.

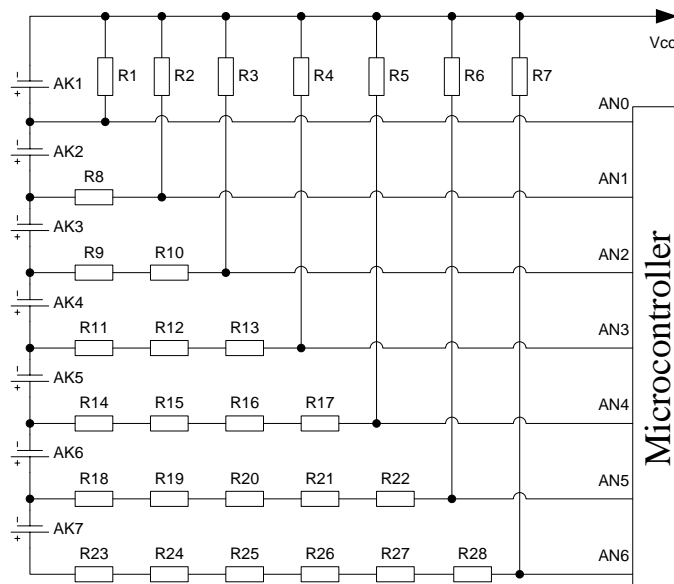


Рисунок 7.11 – Схематехнічна реалізація подільника напруги

Опори резисторів R1-R28 рівні. Точність обчислень реальної напруги на акумуляторі залежить від точності резисторів. Виходячи з побудови схеми ділення (рис.7.11), напруга кожного акумулятора обчислюється за формулою:

$$U_{akn} = n \cdot U_{ann} - (n-1)U_{ann-1}, \quad (7.28)$$

де U_{akn} обчислена напруга акумулятора; n номер акумулятора, напруга якого обчислюється; U_{ann} вимірена приведена напруга на аналоговому вході акумулятора, напруга якого обчислюється; $n-1$ номер попереднього акумулятора; U_{ann-1} вимірена приведена напруга на аналоговому вході попереднього акумулятора.

Нижче наводиться алгоритм обчислення напруги під час реалізації схеми вимірювання методом резистивних подільників:

- вимірювання приведеної напруги акумулятора U_{ann} проводиться згідно алгоритму обчислення напруг [1120];
- здійснюється множення обчисленої приведеної напруги на номер акумулятора батареї: $U_{Sak} = n \cdot U_{ann}$;
- виконується дія: $U_{akn} = U_{Sak} - U_{Sak-1}$, де $U_{Sak-1} = (n-1)U_{ann-1}$. Напруга є обчисленою напругою акумулятора з номером n .

На практиці опори резисторів подільника відрізняються за своїми параметрами, тому таке схемотехнічне рішення вносить похибку в обчислення напруги акумуляторів.

Як видно з формули (7.28), величина обчисленої напруги акумулятора залежить від похибки подільників молодших акумуляторів. Отже, у схемі, показаній на рис.7.11, найбільшу похибку під час обчислення напруги буде мати акумулятор з індексом $Ak7$, найменшу $Ak1$.

Таблиця 7.1 – Функції графіків

№Ак	Умова	Функція зміни напруги	
		Вимірене приладом	Обчислене значення
7	Заряд	$y=0,0005x+4,0019$	$y=0,0006x+4,0424$
4	Заряд	$y=0,0005x+3,975$	$y=0,0005x+4,0083$
1	Заряд	$y=0,0006x+3,9934$	$y=0,006x+3,9781$
7	Розряд	$y=-0,001x+3,6859$	$y=-0,0011x+3,7242$
4	Розряд	$y=-0,001x+3,6840$	$y=-0,0011x+3,6653$
1	Розряд	$y=-0,001x+3,6013$	$y=-0,001x+3,5957$

Як видно з табл.7.1, різниця між тангенсами кута нахилу вимірених і обчислених функцій кривих відповідних акумуляторів неприйнятно мала, що уможливорює припущення, згідно з яким різниця між вільними членами виміреної й обчисленої функцій є середньою похибкою обчислення напруги в усьому діапазоні вимірювання. У табл.7.2 наведена похибка обчислення напруг для кожного акумулятора.

Як видно з табл.7.2, похибка обчислення напруги для $Ak7$ найбільша й складає при заряді 40,5мВ, при розряді – 38,3мВ .

Для зменшення похибки для кожної обчисленої напруги акумулятора вводяться коригуючі коефіцієнти. Величина коефіцієнтів для кожного набору резисторів носить індивідуальний характер.

Таблиця 7.2 – Похибка обчислення напруг

№Ак	Умова	Похибка обчислення, $\Delta\epsilon_R, \text{мВ}$
7	Заряд	40,5
4	Заряд	33,3
1	Заряд	15,3
7	Розряд	38,3
4	Розряд	18,7
1	Розряд	5,6

Метод комутації вимірювальних виводів акумулятора. Цей принцип схемотехнічного рішення вимірювання напруг послідовно з'єднаних акумуляторів базується на комутації виводів вимірювача напруги до вимірювальних виводів акумуляторів. Тут вимірювальний вивід аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера комутується до позитивного виводу акумулятора, а загальний вивід – до виводу від'ємного потенціалу. Подібна комутація напруг дозволяє виключити взаємний вплив елементів вимірювального ланцюга на обчислення напруг кожного акумулятора системи. Таке рішення потребує необхідності забезпечення гальванічної розв'язки між загальним виводом вимірювача напруг і загальним виводом тягової акумуляторної батареї електромобіля. Структурна схема апаратної реалізації, представлена на рис.7.12, забезпечує гальванічну розв'язку вимірювальної частини електричної схеми від загального виводу тягової акумуляторної батареї.

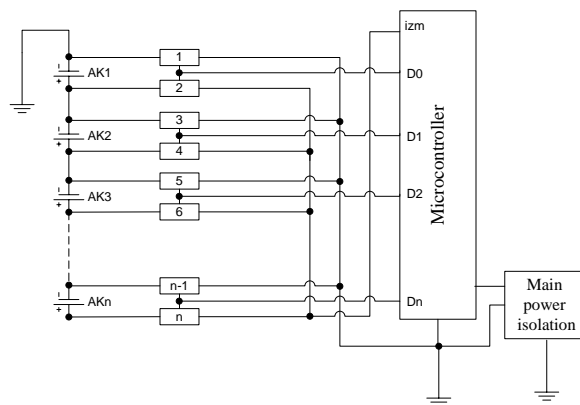


Рисунок 7.12 – Структурна схема гальванічної розв'язки вимірювання напруги

Тут $K_{OM0}-K_{OMn}$ – оптоелектронні ключі, які змінюють свій стан під впливом керуючого сигналу $D_0- D_n$ і дозволяють по чергову забезпечувати підключення вимірювальних ланцюгів кожного акумулятора до мікроконтролера. Елементи K_{OM} комутуються попарно ($K_{OM0}-K_{OM1}$, $K_{OM2}-K_{OM3}$, $K_{OM4}-K_{OM5}$, $K_{OMn-1} - K_{OMn}$). Електронний ключ K_{OM} , підключений до від’ємного виводу акумулятора, на якому передбачається вимірити напругу, комутується зі схемною землею гальванічно розв’язаної системи, а ключ K_{OM} , підключений до позитивного виводу акумулятора – до вимірювального входу аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера. У процесі роботи алгоритму вимірювання може бути замкнута тільки одна пара електронних ключів K_{OM} , в іншому випадку через систему пройде струм, близький за значенням до струму короткого замикання.

Еквівалентна електрична схема підключення акумулятора до вимірювального входу АЦП представлена на рис. 7.13.

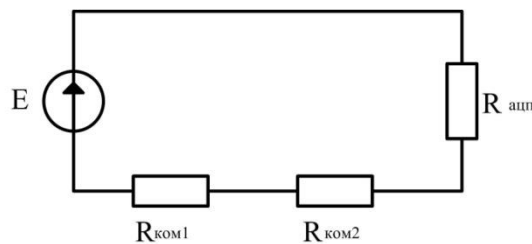


Рисунок 7.13 – Еквівалентна схема заміщення комутації вимірювального каналу до входу аналогово-цифрового перетворювача

Так як опір ключів $R_{КОМ1}$ і $R_{КОМ2}$ набагато менший за опір вимірювального входу АЦП, то падінням напруги на $R_{КОМ1}$ і $R_{КОМ2}$ можна знехтувати ($R_{КОМ1}$, $R_{КОМ2}$, $\ll R_{ацп}$).

Пристрій вимірювання напруги побудований за принципом гальванічної розв’язки, спроектований на базі мікропроцесорної логіки й забезпечує передачу й протоколювання даних в ЕОМ інтерфейсом RS-232. Спеціалізоване програмне забезпечення, встановлене на ЕОМ, розшифровує отриманий пакет даних і виводить значення по кожному каналу вимірювань на екран монітора в

цифровому десятковому й графічному вигляді. Протокол результатів вимірювань дозволяє зіставити значення обчислених напруг акумуляторів з напругами, виміреними за допомогою вольтметра. Вимірювання різниці потенціалів за допомогою перевірного вольтметра В7-34А й пристрою вимірювання, проводяться безпосередньо на борах кожної ячейки електрохімічного накопичувача енергії. Електрохімічний накопичувач енергії являє собою акумуляторну батарею, яка складається з 8-ми Li-іонних акумуляторів ємністю 10А·год і з'єднаних у послідовний ланцюг. Так як вимірювання проводяться в умовах заряду чи розряду, то для відповідності отриманих даних необхідно одночасно фіксувати виміряну напругу за допомогою вольтметра й обчислену напругу, що відображається на екрані монітора ПЕОМ. Для побудови графіків зміни напруги проводилось 6-ть вимірів із дискретністю в 10 хвилин [121].

Відповідність виміряних значень напруги за допомогою перевірного вольтметра В7-34А (виміряне значення) й мікропроцесорної системи вимірювання (обчислене значення) в режимі заряду й розряду наведені в табл.7.3 і табл.7.4 відповідно.

Таблиця 7.3 – Режим заряду

Вимірювання напруги за допомогою вольтметра В7-34А									Вимірювання за допомогою мікропроцесорної системи вимірювання напруги (протокол даних ЕОМ)							
№ вим.	U АК 1	U АК 2	U АК 3	U АК 4	U АК 5	U АК 6	U АК 7	U АК 8	U АК 1	U АК 2	U АК 3	U АК 4	U АК 5	U АК 6	U АК 7	U АК 8
1	3,922	3,902	3,905	3,904	3,906	3,906	3,909	3,931	3,920	3,900	3,905	3,905	3,905	3,905	3,910	3,930
2	3,952	3,930	3,932	3,931	3,932	3,930	3,936	3,955	3,949	3,930	3,930	3,930	3,930	3,930	3,935	3,954
3	3,972	3,951	3,953	3,952	3,953	3,949	3,958	3,976	3,969	3,949	3,954	3,949	3,949	3,949	3,954	3,978
4	3,991	3,967	3,970	3,969	3,970	3,965	3,975	3,992	3,988	3,969	3,969	3,969	3,969	3,969	3,964	3,974
5	4,007	3,980	3,983	3,982	3,983	3,978	3,988	4,005	4,008	3,978	3,983	3,983	3,983	3,978	3,988	4,003
6	4,019	3,991	3,994	3,993	3,994	3,988	3,999	4,016	4,018	3,988	3,993	3,993	3,993	3,988	3,998	4,018

Таблиця 7.4 – Режим розряду

Вимірювання напруги за допомогою вольтметра В7-34А									Вимірювання за допомогою мікропроцесорної системи вимірювання напруги (протокол даних ЕОМ)							
№ ви м.	U АК 1	U АК 2	U АК 3	U АК 4	U АК 5	U АК 6	U АК 7	U АК 8	U АК 1	U АК 2	U АК 3	U АК 4	U АК 5	U АК 6	U АК 7	U АК 8
1	3,895	3,928	3,928	3,928	3,924	3,920	3,926	3,889	3,895	3,925	3,925	3,925	3,925	3,920	3,925	3,891
2	3,867	3,902	3,903	3,904	3,900	3,897	3,902	3,866	3,866	3,905	3,905	3,905	3,900	3,900	3,905	3,866
3	3,846	3,882	3,882	3,884	3,879	3,878	3,882	3,846	3,847	3,881	3,881	3,886	3,871	3,876	3,881	3,847
4	3,829	3,863	3,863	3,865	3,860	3,861	3,863	3,829	3,827	3,866	3,866	3,866	3,861	3,861	3,861	3,827
5	3,813	3,846	3,845	3,847	3,842	3,845	3,845	3,812	3,812	3,847	3,847	3,847	3,842	3,847	3,847	3,812
6	3,795	3,828	3,827	3,829	3,824	3,828	3,827	3,794	3,793	3,827	3,827	3,827	3,822	3,827	3,827	3,793

Рівняння кривих заряду/розряду, отримані в результаті лінійної апроксимації, зведені в табл.7.5.

Таблиця 7.5 – Функції графіків

№	Умова	Функція зміни напруги	
		Вимірене значення	Обчислене значення
Ак7	Заряд	$y=0,0191x+3,9103$	$y=0,0196x+3,9067$
Ак4	Заряд	$y=0,0176x+3,8937$	$y=0,0177x+3,8929$
Ак1	Заряд	$y=0,0178x+3,8985$	$y=0,0177x+3,8979$
Ак7	Розряд	$y=-0,0196x+3,9427$	$y=-0,0195x+3,9427$
Ак4	Розряд	$y=-0,0196x+3,9447$	$y=-0,0195x+3,9444$
Ак1	Розряд	$y=-0,0194x+3,9087$	$y=-0,0198x+3,9092$

Як видно з табл. 7.5, відмінність кутів нахилу відповідних кривих для кожного акумулятора нескінченно мала, що дозволяє рахувати різницю між вільними членами відповідних апроксимованих кривих постійної у всьому

часовому інтервалі вимірів. Похибка обчислення напруг для кожного акумулятора зведена в табл.7.6.

Таблиця 7.6 – Похибка обчислення напруг

№Ак	Умова	Похибка обчислення, $\Delta\epsilon_R$, мВ
7	Заряд	3,6
4	Заряд	0,8
1	Заряд	0,6
7	Розряд	0
4	Розряд	0,3
1	Розряд	0,5

Із таблиці видно, що максимальна усереднена похибка обчислення напруги відносно вимірювання перевірним приладом В7-34А складає 3,6мВ в режимі заряду, і не більше 0,5мВ при розряді. Більш висока усереднена похибка у режимі заряду, обумовлена впливом завад імпульсного джерела струму.

Для вибору схемотехнічного рішення вимірювання напруг необхідно провести порівняння отриманих експериментальних даних і розглянути переваги й недоліки обох методів.

Зіставимо усереднену похибку вимірювань, отриману при заряді й розряді в схемах вимірювання напруг з подільником напруги й комутацією вимірювальних виводів акумулятора (табл.7.7 а, б).

Максимальна усереднена похибка обчислення $\max\Delta\epsilon_R$ при заряді й розряді у схемі на основі дільника напруги спостерігається для акумулятора Ак7 (табл.7.7а), бо обчислення напруги поданого акумулятора залежить від обчисленої напруги на попередніх акумуляторах [122]:

$$\Delta\epsilon_{Rn} = U_{AKn} - U_{AKn \text{ вим}}, \quad (7.29)$$

де $\Delta\varepsilon_{Rn}$ - похибка обчислення напруги на акумуляторі з порядковим номером n ; U_{AKn} - напруга акумулятора, обчислена за формулою (7.28); $U_{AKn \text{ вим}}$ - напруга акумулятора, вимірена перевірним приладом.

Таблиця 7.7а – Співставлення усередненої похибки вимірювання (заряд)

№ Ак	Схема вимірювання на основі подільника напруг (усереднена похибка обчислення напруги, $\Delta\varepsilon_R$, мВ)	Схема вимірювань на основі гальванічної розв'язки (усереднена похибка обчислення напруги, $\Delta\varepsilon_{\text{гал}}$, мВ)
Ак1	15,3	0,6
Ак4	33,3	0,8
Ак7	40,5	3,6

Таблиця 7.7б – Співставлення усередненої похибки вимірювання (розряд)

№ Ак	Схема вимірювання на основі подільника напруг (усереднена похибка обчислення напруги, $\Delta\varepsilon_R$, мВ)	Схема вимірювань на основі гальванічної розв'язки (усереднена похибка обчислення напруги, $\Delta\varepsilon_{\text{гал}}$, мВ)
Ак1	5,6	0,5
Ак4	18,7	0,3
Ак7	38,3	0

У схемі з комутацією виводів похибка обчислення $\Delta\varepsilon_{\text{гал}}$ не залежить від обчисленої напруги на попередніх акумуляторах, бо вимірювання напруги в цьому випадку відбуваються безпосередньо на потенціальних виводах акумулятора без попередніх схем узгодження.

Зіставимо максимальну усереднену похибку обчислення напруги для схеми з дільником напруг і комутацією виводів ($_{\text{max}}\Delta\varepsilon_R = 40,5$ мВ, $_{\text{max}}\Delta\varepsilon_{\text{гал}} = 3,6$ мВ) при заряді і розряді за формулою:

$$k = \frac{\max \Delta \varepsilon_R}{\max \Delta \varepsilon_z}, \quad (7.33)$$

де k коефіцієнт відношення максимальних усереднених похибок напруг; $\max \Delta \varepsilon_R$ максимальна усереднена похибка вимірювання у схемі з подільником напруг; $\max \Delta \varepsilon_{заг}$ максимальна усереднена похибка обчислення в схемі з комутацією вимірювальних виводів.

Підставивши у формулу (7.30) усереднені похибки вимірювання (згідно табл.7.7а і табл.7.7б), маємо:

- під час заряду максимальна усереднена похибка обчислення напруги у схемі з подільником напруг перевищує похибку обчислення у схемі з комутацією вимірювальних виводів у $k = 11,25$ разів;
- під час розряду максимальна усереднена похибка обчислення напруги у схемі з подільником напруг перевищує похибку обчислення у схемі з комутацією вимірювальних виводів у $k = 76,6$ разів.

У ході проектування схеми вимірювання напруг на основі подільника напруг для кожного виробу необхідно вводити індивідуальні коефіцієнти для компенсації постійної складової похибки вимірювання подільника. Домогтися високої точності вимірювання при вказаному схемотехнічному рішенні навіть із високоточними резистивними елементами в повній мірі не вдається. Виробництво серійної продукції із застосуванням схеми з подільником напруг утруднене через природний розкид параметрів резисторів. Але все-таки подане схемотехнічне рішення достатньо просте в реалізації й наочне для розуміння, але не забезпечує потрібної точності вимірювання напруги ($\pm 0,5\%$).

Схема з комутацією вимірювальних виводів акумуляторів батареї забезпечує задану точність обчислення напруги в $0,5\%$ (див. табл.7.7а, 7.7б), але її схемотехнічна реалізація більш складна, бо потребує додаткового джерела напруги з гальванічною розв'язкою за живленням і комутаційних оптоелектронних елементів. З погляду програмної реалізації алгоритм обчислення напруги більш спрощується в порівнянні з алгоритмом схеми з подільником напруг, бо не потребує додаткових обчислювальних операцій.

Із проведеного порівняльного аналізу можна зробити висновок, що, не зважаючи на можливість більш простої реалізації схеми з подільником напруги й наочності її сприйняття, вона не може забезпечити потрібну точність вимірювання. У результаті низької точності вимірювання напруг, при перезаряді, термін експлуатації літій-іонних акумуляторів може бути значно скорочений, бо періодичне перевищення напруг акумулятора призводить до виділення металевого літію, що має високу реагентну здатність у відношенні до електроліту. При недозаряді й недорозряді акумулятор не віддає потрібну кількість енергії. Очевидно, що в останньому випадку функція нівелювання напруг акумуляторів втрачає смисл.

Не зважаючи на більш дороге і складне схемотехнічне рішення, в методі вимірювання напруг комутацією вимірювальних виводів відсутні недоліки, які можуть призвести до перезаряду, недозаряду чи недорозряду акумулятора.

Сказане вище визначає причини, з яких поданий метод вимірювання напруги рекомендується для застосування в системі контролю й керування літій-іонною акумуляторною батареєю тягового привода.

Порівняємо переваги й недоліки обох методів вимірювання струму [123].

1. Індуктивний датчик струму.

1.1. Переваги:

- гальванічна розв'язка силового й вимірювального ланцюгів;
- вимірювання напруги на навантажувальному резисторі R_m внутрішнім АЦП мікроконтролера;
- більш високий робочий температурний діапазон, ніж у шунта;
- час реакції на вимірювання сигналу не більше 1 мкс.

1.2. Недоліки:

- потрібне джерело двополярної напруги живлення.

2. Вимірювання за допомогою шунта.

2.1. Переваги:

- простота обслуговування;

- простота установки.

2.2. Недоліки [124]:

- потрібен зовнішній АЦП для вимірювання падіння напруги на шунті;
- потрібна синхронізація переключення АЦП мікроконтролера для вимірювання напруг акумуляторів і зовнішнього АЦП для вимірювання падіння напруги на шунті;
- час отримання результату перетворення не менше 2мс;
- ускладнення програмного забезпечення мікроконтролера для реалізації обміну даними із зовнішнім АЦП інтерфейсом SPI;
- більш низький температурний діапазон роботи, ніж у індуктивного датчика струму.

Як видно з перерахованих переваг і недоліків обох методів, робота з шунтом ускладнює програмно-апаратну реалізацію системи керування, незважаючи на простоту його обслуговування і більш низьку вартість. Але сукупність додаткових програмно-апаратних засобів, необхідних для забезпечення функціонування шунта в системі контролю й керування, значно збільшує вартість розробки. Недолік – у необхідності двополярного живлення індуктивного датчика струму компенсується за рахунок самої організації схемотехніки системи контролю й керування. Система контролю й керування має власне джерело живлення (DC/DC перетворювач), гальванічно розв'язане від загального виводу силового ланцюга акумуляторної батареї. Широка номенклатура DC/DC перетворювачів дозволяє обрати джерело двополярної напруги, що живить.

Застосуванню індуктивного датчика струму надається перевага у процесі функціонування в складі системи контролю й керування тяговою батареєю електровоза. Але струмовий шунт рекомендується встановлювати в силовий ланцюг батареї для забезпечення вхідного контролю при налаштуванні й перевірки системи контролю й керування батареї тягового привода електровоза.

7.4 Спосіб визначення неполадок у тягових акумуляторних батареях шахтних електровозів

Задачею даного етапу досліджень є вдосконалення системи діагностування тягових акумуляторних батарей.

Технічний результат від використання запропонованого рішення полягає в суттєвому спрощенні системи контролю справності ТАБ, дозволити знизити витрати й підвищити надійність [125].

Поставлена задача вирішується так, що діагностування акумуляторних батарей передбачає постійний контроль справності акумуляторної батареї в усіх режимах її роботи за допомогою системи контролю.

Згідно корисної моделі діагностика акумуляторної батареї визначають шляхом порівняння напруг на двох половинах акумуляторної батареї. Систему контролю виконують у вигляді дільника напруги та пристрою контролю різниці напруг. При цьому дільник напруги виконують за допомогою послідовно з'єднаних резисторів, які підключають до контактів акумуляторній батареї. Пристрій контролю різниці напруги підключають між середньою точкою акумуляторної батареї та середньою точкою дільника напруги. Акумуляторну батарею з пристроєм контролю підключають до навантаження або зарядного пристрою.

Процес діагностування акумуляторної батареї реалізується наступним чином.

Пристрій контролю різниці напруг розміщується між двома половинами акумуляторної батареї "а" і до середньої точки дільника напруги "б". Дільник напруги виконуємо у вигляді послідовно з'єднаних резисторів $R1$, $R2$, які підключаємо до контактів акумуляторної батареї ("+", "-") (рис. 7.14).

Пристрій контролю різниці напруги в найпростішому випадку може бути вимірювачем постійної напруги з нулем посередині або більш складним пристроєм контролю напруги з наступною дією на сигнал або відключення акумуляторної батареї.

Якщо акумуляторна батарея справна в будь-яких експлуатаційних режимах, - як під час зарядки, так и в завантажувальному режимі, – напруга між середньою точкою батареї та середньою точкою дільника напруги близька до нуля.

При будь-яких відхиленнях напруги в акумуляторній батареї, – таких як короткі замикання або обриви всередині окремих елементів, короткі замикання або обриви зовнішніх з'єднань елементів батареї, зміна внутрішніх опорів та опорів міжелементних з'єднань, зміна ємності, переполюсовка елементів і т.п., – баланс напруг порушується і з'являється напруга, яка фіксується пристроєм контролю [126].

Своєчасне діагностування стану акумуляторних батарей дозволяє обмежити їх розряд і знизити витрати на експлуатацію.

Запропонована діагностика значно простіша, дешевша та надійніша прототипу, вона придатна для будь-якого типу акумуляторів, у т. ч. безумовно, й тягових.

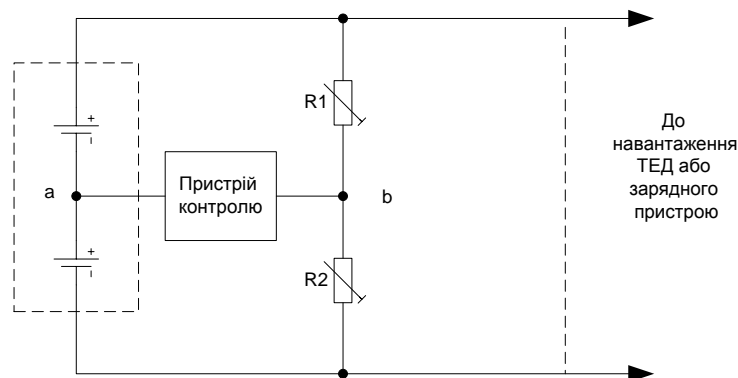


Рисунок 7.14 – Контроль справності акумуляторної батареї

Проведені дослідження пристрою діагностування акумуляторних батарей показали високу ефективність і надійність при різних експлуатаційних режимах.

Новий спосіб діагностування акумуляторних батарей передбачає постійний контроль справності акумуляторної батареї в усіх режимах її роботи за допомогою системи контролю, який відрізняється тим, що працездатність батареї визначають шляхом порівняння напруг на двох половинах акумуляторної батареї.

Пристрій контролю виконують у вигляді дільника напруги та пристрою контролю різниці напруги, а дільник напруги виконують за допомогою послідовно з'єднаних резисторів, які підключають до вхідних контактів тягової акумуляторної батареї, а пристрій контролю напруги підключають між середньою точкою акумуляторної батареї та середньою точкою дільника напруги, після чого акумуляторну батарею підключають до навантаження або зарядного пристрою й контролюють наявність напруги на пристрої контролю різниці напруги.

Для високої точності виміру напруги акумуляторів батареї й простоти введення в експлуатацію пристрою вимірювання необхідно використовувати схему комутації вимірювальних виводів акумулятора до вимірювальних входів пристрою вимірювання напруг.

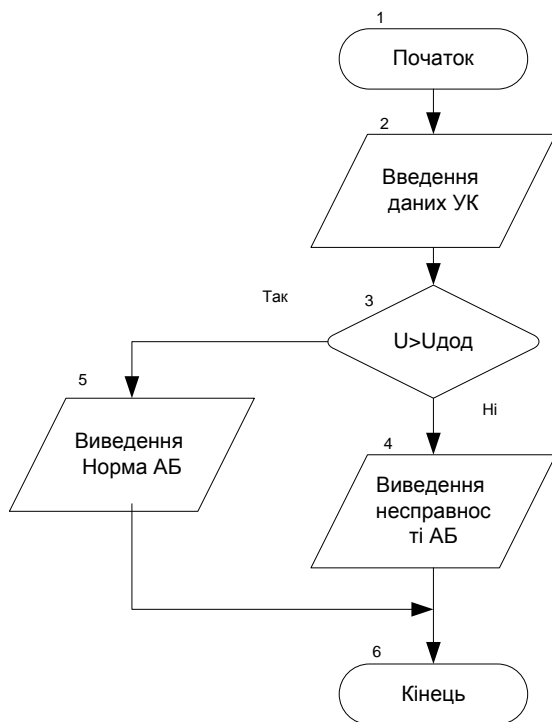


Рисунок 7.15 – Алгоритм реалізації діагностики стану акумуляторної батареї

Алгоритм реалізації діагностування стану акумуляторної батареї з використанням мікропроцесора представлений на рис.7.15. Дані пристрої контролю формують логічну змінну або числове значення. У процесі застосування логічної змінної на виході пристрою контролю формується логічний «нуль», якщо величина напруги між середніми точками акумулятора й

резисторного дільника не перевищує допустимої величини, зазвичай $2B$, і логічну «одиницю» в іншому випадку, яка вводиться в мікропроцесорний пристрій (блок 2 рис.7.15) [128].

Контрольні питання до розділу 7

1. Які особливості акумуляторних батарей як елементів систем тягових електротехнічних комплексів шахтних електровозів?
2. Перерахуйте характеристики тягових акумуляторних батарей.
3. Які є етапи, на які необхідно розділити отримання наступних часткових математичних моделей для аналізу властивостей АБ?
4. Як можна охарактеризувати математичну модель АБ, що характеризує властивості АБ на ділянці, обмеженій часом протікання процесів поляризації?
5. Як можна охарактеризувати математичну модель АБ, що характеризує властивості АБ як об'єкта керування, яка у складі ТЕТК?
6. Як можна охарактеризувати математичну модель АБ на ділянці часу від 0 до $t_3(t_p)$ при заданому діапазоні зміни струмів (напруги) заряду-розряду для синтезу електричної схеми заміщення?
7. Які існують можливі варіанти схемотехнічних рішень підсистем моніторингу стану тягових акумуляторних батарей шахтних контактних акумуляторних електровозів?
8. Які ви знаєте способи визначення неполадок у тягових акумуляторних батареях шахтних електровозів?
9. Які є переваги й недоліки методів вимірювання струму?

Розділ 8 Сучасні розробки систем накопичення електричної енергії

8.1 Огляд сучасних тенденцій розвитку систем накопичення електричної енергії

Завдяки новітній технологічній революції на економічну арену на ряду з Smart Grids, Smart Metering, Smart Appliance виходять такі нові електричні технології, операційні елементи та інструменти управління як Energy Storage, Demand Side Response, Big Data, Blockchain, які вже розпочали свою «революцію» у функціонуванні енергетичних систем, змінюють стратегію та ринкову поведінку всіх учасників та вводять нових гравців [129].

Серед цих новітніх елементів є один, на нашу думку, дуже «цінний» це Energy Storage, оскільки з його використанням створюються переваги для кожного сегменту енергетичної системи: 1) підвищується ефективність енергосистеми, її стабільність, надійність і стійкість електричної мережі; 2) зростає самоспоживання та самовиробництво електроенергії; 3) покращується доступ до електроенергії шляхом автономної електрифікації; 4) змінюється характер суспільних відносин, зменшується залежність від монополістів.

В залежності від особливостей (розмір, потужність, тривалість) роботи вказаних технологій можемо їх згрупувати в три категорії: I короткотермінове застосування (від секунд – до хвилин); II – коротко та довготермінове застосування; III – довготермінове застосування (від годин до сезонів).

На початку 2020 року Урядом Великобританії була опублікована Зелена книга «Нова промислова стратегія», яка наголошує на розвитку технологій накопичення та зберігання енергії для підтримки розвитку інтелектуальних енергетичних систем та електромобільної промисловості.

Тим же часом у США компаніями Tesla, Altagas Ltd. і AES Corp вже побудовано три промислових накопичувача енергії на основі літій-іонних акумуляторів, кожен з яких за обсягами перевищує будь-який раніше побудованих батарейних накопичувачів. У сукупності їх потужність відповідає приблизно 15% потужності накопичувачів, встановлених в 2016 р. у всьому світі.

Найбільший з об'єктів – це накопичувач від AES Corp. потужністю 30 МВт і ємністю 120 МВт·год.

В Австралії встановлена потужність побутових систем зберігання сонячної енергії зростає в 13 разів, за рік було встановлено 6 750 систем зберігання. До кінця 2020 року країна планує довести встановлену потужність систем зберігання енергії до 200 ГВт·год [130].

Німеччина має один з найбільших в світі ринків побутового зберігання електроенергії (на кінець 2015 року можливості побутового зберігання електроенергії становили 67 МВт, в країні налічувалось 19 000 систем зберігання енергії). Швидке зниження цін на системи зберігання та державна програма стимулювання їх розвитку роблять в Німеччині привабливою для широкого застосування технологію «сонячна енергія + збереження». За аналітичними даними протягом наступних 5 років ринок побутового зберігання електроенергії в країні зростає в 11 разів з точки зору потужності накопичувачів.

Tesla удосконалила свою настінну акумуляторну батарею, подвоївши її потужність та зменшивши розмір на третину, та запропонувала ринку модель PowerWall2, її ціна є вдвічі нижчою від попередньої.

Корейська LG Chem – вже пропонує повну комплектацію «сонячна енергія + збереження» з акумуляторною батареєю 6.4 кВт·год. Наразі виробник також пропонує домогосподарствам літій-іонний акумулятор 9.8 кВт·год.

Для розгортання будь-якої нової технології необхідна нормативно-правова база, а оскільки системи накопичення та зберігання енергії, це не просто нові технології, а «революційні» технології, то і підходи до формування нормативно-правової бази мають бути інноваційні. Технологія Energy Storage породжує не просто нових повноцінних учасників ринку, вона породжує «універсальних» учасників, що можуть працювати на всіх організованих ринках (електроенергії, потужності та допоміжних послуг). Вони здатні забезпечити реальну конкуренцію та сприяти встановленню справедливих і розумних цін, на кожному з цих ринків.

Для початку слід систематизувати всі системи накопичення та зберігання енергії, це полегшить розробку заходів для зняття бар'єрів виходу та в подальшому дозволить ефективно інтегрувати нові елементи в організовані ринки. Наприклад, FERC виділила два види систем накопичення та зберігання енергії: Electric Storage Resource (ESR) ресурс електричного зберігання та Distributed Energy Resource (DER) розподілений енергетичний ресурс.

ESR здатний отримувати електроенергію з мережі та зберігати її для пізнішої віддачі в мережу незалежно від того, де в енергосистемі розміщений цей ресурс. Він включає всі види технологій зберігання електроенергії незалежно від їх розміру, носія (акумуляторні батареї, стиснене повітря, гідроакумуляування), а також розміщення (чи в системі електропередачі, чи в системі розподілу).

DER, в свою чергу, – це джерело або споживач енергії, які знаходяться в системі розподілу (тобто будь-яка підсистема) або «за лічильником» споживача. Цей ресурс може включати ресурс електричного зберігання, а також розподілену генерацію, акумуляування теплової енергії, електромобілі та пристрої живлення.

Серед заходів для зняття бар'єрів виходу ESR на організовані ринки ми виділяємо шість основних: 1) має бути створена модель участі, яка розпізнає особливі фізичні та операційні характеристики ESR та надає їм відповідне право; 2) діючі технічні вимоги мають бути переглянуті та розширені для ESR; 3) заявка ESR на ринку має бути відмінна від тієї, що подається «традиційною» установкою, оскільки з урахуванням тривалості та можливостей зарядки та розрядки ESR, вони є значно гнучкішими; 4) необхідно врахувати можливості ESR працювати на ринку як з позиції оптового продавця, так і з позиції оптового покупця електроенергії, та надати їм право вільно обирати свою стратегію роботи; 5) необхідно встановити вимоги щодо мінімального розміру ESR для участі в оптовому ринку, який би дозволив в повній мірі використовувати операційні можливості ESR та відповідно отримувати переваги від зростання конкуренції (мінімальний розмір установок ESR, який вважається FERC доцільним для участі в оптовому ринку, складає 100 кВт); 6) має бути визначено підхід до ціноутворення на електроенергію, що продається на організованих

ринках установкам ESR з метою її зберігання та наступного перепродажу на цих ринках [131].

Щодо DER, то нам вбачаються важливими п'ять заходів, які би унеможливили бар'єри на шляху їх впровадження. По-перше, необхідно надати DER право участі в організованих ринках шляхом їх агрегації; для агрегації має бути використаний географічний підхід. По-друге, розробити параметри заявки для того, щоб в ній містилася інформація щодо джерел та відповідних обсягів електроенергії, які ввійшли до загальної заявки агрегованого DER; встановити вимоги до інформації та даних для агрегованого DER (зокрема, мова йде про інформацію щодо кожного розподіленого енергетичного ресурсу, його потужність, місцезнаходження, експлуатаційні межі). По-третє, визначити підходи, що застосовуються при виставленні вимог до системи обліку та телеметрії індивідуального DER та агрегованого DER. По-четверте, забезпечити необхідну координацію дій між оператором системи передачі, оператором системи розподілу, агрегованим DER та компанією з розподілу електроенергії. І на останнє, розробити типовий договір про участь агрегованого DER на ринку, яким би агрегований DER, гарантував, що кожен його індивідуальний ресурс відповідає діючим правилам, нормам та операційним процедурам.

На перший погляд здається, що все вищеописане може розвиватися, впроваджуватися та працювати Сполучених Штатах Америки, Великобританії, Німеччині, та не може бути в Україні, бо для нашої країни це «не на часі», як полюбляють говорити деякі фахівці. Однак зарубіжні експерти вже й без нас змоделювали українську енергетичну систему 2050 року, що функціонує на основі 100% ВДЕ, як частину світової, та зауважили, що українська енергетика може працювати в умовах використання новітніх технологій [132].

Модель Energy Storage передбачає здатність енергосистеми з допомогою Energy Storage покривати протягом року до 35% попиту на електроенергію, тобто кожну третю кіловат-годину, що споживатиметься, 17% при цьому або кожна шоста кіловат-година споживання покриватиметься за рахунок акумуляторних батарей. Для порівняння зараз в Україні за рахунок ГАЕС в години нічного

провалу акумулюється близько 14% електроенергії, а в години максимального навантаження покривається близько 8% споживання.

Відповідно до поглядів закордонних енергетичних експертів основними технологіями Energy Storage, на які опиратиметься українська енергосистема 100% ВДЕ будуть акумуляторні батареї, що забезпечать коротко - термінове зберігання електроенергії, та технологія Power-to-Gas, що буде значним ресурсом сезонного зберігання після 2035 року. Після 2040 року, тобто вже майже через 20 років, в українській енергосистемі домінуватимуть сонячні фотоелектричні системи та акумуляторні батареї (у тому числі у формі взаємодії електротранспорту і електромережі (V2G connections)).

8.2 Загальні характеристика Smart batteries

З початку 21-го століття, можливості використання удосконалень у технологіях електронних комунікацій для усунення обмежень і витрат у електричних мережах стали очевидними.

Інфраструктура наступного покоління для передачі та розподілу електроенергії буде краще пристосована для двонаправлених потоків енергії, що дозволяє розподілену генерацію від сонячних батарей на дахах будинків, паливних елементів, заряджання/розряджання батарей електромобілів, вітрових турбін, гідроакумулювальних електростанцій та інших джерел.

Інновації у надпровідності, стійкості до відмов, зберіганні енергії, силовій електроніці і діагностичних компонентах змінюють фундаментальні властивості мереж. Технології в межах цих широких категорій R&D включають в себе: пристрої гнучкої системи передачі струму, постійний струм високої напруги, дріт з надпровідників першого і другого роду, кабель з високотемпературних надпровідників, розподілену генерацію і зберігання енергії, композитні провідники і "інтелектуальні" прилади [133].

Основні програми

Grid 2030 є об'єднаним баченням розвитку електричної системи США, розробленим енергетичними компаніями, виробниками обладнання,

постачальниками інформаційних технологій, агенціями урядів штатів та федерального уряду, групами зацікавлених, університетами та національними лабораторіями. Воно покриває генерацію, передачу, розподіл, зберігання та споживання. Дорожня карта національних технологій постачання є основним документом щодо реалізації бачення Grid 2030. Дорожня карта окреслює основні проблеми та завдання щодо модернізації електромережі і пропонує шляхи для уряду і галузі до побудови майбутньої енергосистеми Америки.

GridWorks – програма Департаменту енергетики США, зосереджена на покращенні надійності енергетичної системи через модернізацію ключових компонентів електромережі, таких як кабелі, підстанції, захисні системи та силова електроніка. Програма також передбачає координацію зусиль щодо систем високотемпературних надпровідників, технологій забезпечення надійності передачі, технологій розподілу електроенергії, пристроїв зберігання енергії та систем GridWise [134].

Настанови, стандарти та групи користувачів.

Частина Ініціативи IEEE щодо розумних енергосистем, IEEE 2030.2 є розширенням роботи, присвяченої системам зберігання енергії для передавальних і розподільних мереж. Група IEEE P2030 планує випустити всеосяжний набір керівних принципів для інтерфейсів розумних енергосистем. Нові керівні принципи будуть охоплювати області, в тому числі батареї і суперконденсатори, а також маховики. Група також заощадила зусилля з розробки керівних принципів для інтеграції електричних транспортних засобів у розумні енергосистеми.

MultiSpeak створила специфікацію, яка підтримує функціональні можливості розумної енергосистеми. MultiSpeak має надійний набір визначень інтеграції, який підтримує практично всі програмні інтерфейси, необхідні для розподільчої компанії або для розподільчого підрозділу вертикально інтегрованої компанії. Інтеграція MultiSpeak визначається з використанням розширюваної мови розмітки (XML) і веб-сервісів [135].

Група компаній в рамках LonMark International займається питаннями,

пов'язаними з розумними енергосистемами.

Відділ по вивченню розумних електроенергетичних систем та взаємодії Об'єднаного дослідницького центру Єврокомісії (JRC Smart Electricity Systems and Interoperability) оприлюднив звіт Smart Grid Laboratories Inventory 2018 про наукові дослідження у сфері т.зв. розумних мереж.

Команда дослідників вже декілька років збирає та аналізує дані по науково-дослідній роботі по вивченню розумних мереж. Це вже третій випуск звіту й порівняння з попередніми звітами дає змогу сказати, що науковий потенціал в цієї сфері стрімко розвивається.

Звіт створений на основі даних про 89 лабораторій, які займаються тематикою розумних мереж. Це на 20 лабораторій або в 1,3 раз більше, ніж враховувалось при підготовці попереднього звіту за 2016 рік. При цьому з цих 89 лабораторій 69 знаходяться в Європі та 20 за межами.

Основні ключові висновки цього видання звіту [136]:

- Основним напрямком діяльності лабораторії є генерація та розподілені енергоресурси (цім напрямком займаються 85,2% лабораторій), відповідь на попит (75%), управління мережею (75%) та зберігання електроенергії (70,5%);
- Зростає інтерес до таких тематик як генерація та розподілені енергоресурси, інформаційно-комунікаційні технології та електромобільність;
- Найбільша частина досліджень виконується для енергетичних компаній (70,5% лабораторій проводять дослідження для них). Для промислових компаній та наукових інституцій роботу виконують, відповідно 66% і 65% лабораторій;
- Більше ніж 70% лабораторій займаються питаннями розробки технологій, відповіді на попит у сфері обладнання, розробки стандартів і тестування прототипів;
- 90% лабораторій ведуть свою дослідницьку діяльність на розподільчій мережі, 60% – на «острівної» мережі, 57% – на мережі передачі;
- Майже для 1/3 лабораторій початкові інвестиції склали від 100 000 до 500 000 євро. Майже 1 з 10 лабораторій (11%) отримала спеціалізовані інвестиції в розмірі до 4 - 5 мільйонів євро для проведення лабораторних робіт. Період,

протягом якого здійснюються ці інвестиції, може бути різним, проте майже 4 з 10 лабораторій (38,5%) отримали інвестиції протягом 2-3 років.

Між тим, більшість лабораторій працюють з акумуляторами (80,7%). До перспективних технологій зберігання електроенергії відносять [137]:

- Вуглецево-нейтральне паливо.
- Дослідження в галузі літій-іонних акумуляторів.
- Зберігання енергії в енергосистемі.
- Іоністор Кремнієво-повітряні акумулятори.
- Літій-залізо-фосфатний акумулятор Літій-повітряний акумулятор.
- Нанодротинний акумулятор.
- Пневматичний акумулятор.
- Надпровідниковий магнітний акумулятор.
- Рідкосольовий акумулятор.
- Супермаховик.
- Теплове зберігання енергії.

Нестабільна генерація стимулює подальшу модернізацію інфраструктури енергосистем з відповідним розвитком регулюючих та резервних засобів резервування нестабільної генерації, насамперед Smart batteries. Системи зберігання енергії, що акумулюють енергію на різних рівнях, використовуються для оперативного регулювання режиму енергосистеми та управління коливаннями потужності електромережі.

За оцінкою Всесвітньої Енергетичної Ради (*World Energy Council*) типові рішення застосування систем акумулювання енергії в умовах розвитку ПДЕ наведено на рисунку. Рішення щодо виду та засобу резервування потужності різні за вартістю, ємністю та швидкодією. Системам зберігання енергії для компенсації стохастичності електрогенерації ПДЕ, необхідна спроможність інтенсивно накопичувати (поглинати) енергію протягом годин і навіть хвилин одночасно з можливістю віддавати значні обсяги потужності у режимно обумовлені періоди доби або за зміни метеорологічних умов.

Для підтримання балансу енергосистем та створення маневрового резерву потужності, більш ефективні системи зберігання, які спроможні згладжувати добові та пікові зміни навантаження; для цього більш ефективні **гідроакumuлюючі електростанції (ГАЕС)**.

Станом на 2017 р. на ГАЕС припадає 96% загальної потужності акумулюючих установок (327 проектів потужністю 169 ГВт). Лідерами за встановленою потужністю ГАЕС є Китай (31 999 МВт, 34 ГАЕС), Японія (28 252 МВт, 43 ГАЕС), США (22 561 МВт, 38 ГАЕС).

У Швейцарії в 2017 р. була приєднана до мережі одна з найбільш важкодоступних електростанцій у світі «Linthal-2015». Виробництво і зберігання електроенергії на ГАЕС реалізується за рахунок використання руху води між двома гірськими озерами, розділеними скелею заввишки 630 метрів. За рішенням мережевого оператора швейцарської енергетичної компанії Axpo Trading, за необхідності, подається команда на запуск 4-х гідроагрегатів потужністю 250 МВт ГАЕС.

Накопичувачі енергії на базі літій-іонних батарей (ЛІА) знижують вплив стохастичності генерації на надійність мережі при впровадженні ПДЕ. Накопичувач енергії негайно реагує на зміну навантаження споживача, і в залежності від потреб, накопичує або віддає в умовах диспетчеризації роботи об'єктів генерації [138].

Можливості ЛІА в якості накопичувачів енергії:

– у генерації це: підтримування частоти; компенсація стохастичності режимів генерації ПДЕ; альтернатива будівництву генерувальним потужностям для електропостачання віддалених та ізольованих енергорайонів;

– у мережах: підтримування необхідної якості електроенергії; згладжування піків навантаження в електричній мережі; альтернатива реконструкції мережевої інфраструктури у «вузьких» ділянках мережі; альтернатива розширенню мережевої інфраструктури для електропостачання віддалених та ізольованих енергорайонів;

– для споживачів: зниження витрат на електроенергію; забезпечення безперебійності енергопостачання; підвищення якості електроенергії; використання;

– складі інфраструктури для «розумного» будинку/електромобілів.

Накопичувачі на базі літій-іонних акумуляторів, наприклад компанії Liotech, серійно впроваджуються на об'єктах ПДЕ і мають вагомі переваги по ємності і виконуваних функціях відносно накопичувачів на базі свинцево-кислотних акумуляторів. Система накопичення енергії за технологією ЛІА має адаптивну, «інтелектуальну» модульну платформу для застосування в мережевій інфраструктурі з метою вбудовування в мережу об'єктів генерації на базі ПДЕ.

У США у 2017 р. введено в експлуатацію станцію зберігання енергії на літій-іонних акумуляторах сумарною потужністю 80 МВт•год, побудованою компанією Tesla для енергокомпанії Southern California Edison (SCE). Ця система складається з 400 нових акумуляторних модулів Powerpack Tesla 2 потужністю по 210 кВт. Акумуляторна станція спроможна протягом доби забезпечувати електроенергією 2,5 тисячі домогосподарств. Літій-іонні модулі Powerpack були спеціально розроблені для масового застосування разом з домашніми PV-установками і вітрогенераторами.

Пневмоаккумуляуючі електростанції (ПАЕС), як і ГАЕС, являють собою використовувану в промислових масштабах технологію акумуляування електроенергії, яка може забезпечувати вихідну потужність понад 100 МВт.

Енергетична установка, яка акумулює енергію стислого повітря (compressed air energy storage, CAES) здійснює зберігання стисненого повітря у геологічних підземних порожнинах (наприклад, соляних кавернах) або у спеціальних резервуарах. При нестачі потужності, стиснене повітря із сховища через відповідну систему підігріву подається на турбогенератор електростанції [139].

У Європі триває робота з підвищення ефективності акумуляування енергії у вигляді стислого повітря. У рамках проекту RICAS 2020 за підтримки ЄС у Норвегії проводяться випробування нового типу сховища енергії у печерах зі стисненим повітрям, ефективність яких майже вдвічі перевищить сучасні аналоги,

які втрачають більшу частину потенційної енергії через невикористання системи зберігання тепла, що виробляється на етапі стиснення повітря. Проектом RICAS 2020 передбачено скоротити ці втрати, додавши в схему проміжне підземне сховище, заповнене гравієм. Стиснене повітря, нагріте в процесі закачування, проходить через зазначене сховище і віддає своє тепло гравію. На зворотному напрямі стиснене повітря нагрівається від тепла гравію, розширюється і подається в турбіну. Ефективність такої системи становить 70 – 80%, на відміну від 45 – 55% діючих сховищ стисненого повітря.

Німеччина. Найбільший в Європі промисловий накопичувач енергії діє в німецькому селі Фельдхайм. Підприємство офіційно називається Регіональною регулюючою електростанцією. Призначення електростанції потужністю 10 МВт і ємністю акумуляторів 10,8 МВт•год – накопичувати надлишкову електроенергію, що виробляється ПДЕ, забезпечувати стабільність роботи електромережі.

Великобританія. Обсяг ринку промислових накопичувачів енергії на базі батарей у Великобританії досяг сукупної потужності в 2,3 ГВт. На різних етапах розробки знаходиться близько 200 проектів. Це наочний приклад трансформації сучасного ринку енергетичної системи, в якому накопичувачі енергії починають грати все більш значну роль [140].

Китай є найбільшим виробником літій-іонних акумуляторів. Однак, на китайському ринку паралельно відбувається стрімке зростання виробництва ванадієвих проточних акумуляторів. Новою політикою країни передбачено запуск пілотних проектів, включаючи будівництво 100-мегаватних накопичувачів енергії на основі ванадієвих проточних акумуляторів (Vanadium redox (flow) batteries) до кінця 2020 р. з метою подальшого великомасштабного розгортання подібних проектів протягом наступних п'яти років.

На початку 2017 р. у м. Даляні в провінції Ляонін було відкрито гігафабрику з виробництва ванадієвих проточних акумуляторів компанії Rongke Power. До кінця року побудовано ряд накопичувачів енергії сумарною потужністю 300 МВт, з доведенням у подальшому їх випуску до 3 ГВт на рік. Акумулятори не використовуються в електромобілях, а тільки в стаціонарних системах зберігання

енергії. На зазначеному підприємстві у 2017 р. введено першу чергу по виробництву накопичувачів потужністю 100 МВт на основі ванадієвих проточних акумуляторів. Другу чергу виробництва акумуляторів потужністю 200 МВт передбачено завершити у 2018 р. Дана система зберігання енергії буде працювати в місцевій електромережі провінції Ляонін, і виконувати функції пікової електростанції, при цьому не споживаючи дефіцитну у даному регіоні воду.

Ринок акумуляторів. За оцінкою агенства IRENA, за період з 2014 по 2030 рр. загальний обсяг доступної ємності акумуляторів для зберігання електроенергії на найбільших ринках у Північній Америці, Європі та Азіатсько-Тихоокеанському регіоні збільшиться з 0,8 ГВт до майже 250 ГВт.

Загальна потужність накопичувачів енергії на 2016 р., за винятком ГАЕС, складає 3400 МВт: 41% – літій-іонні батареї, 10% – редокс-акумулятори, свинцево-кислотні, нікель-кадмієві, натрій-сірчасті акумулятори.

Вартість систем зберігання та конструкції різного типу батарейних систем. За оцінкою IRENA, вартість систем акумулявання продовжує знижуватися, окремі види батарейних технологій виробництва наближено до нижньої межі, зумовленої собівартістю основних матеріалів і хімічних сполук. На окремі технології прогнозується зниження ціни до 2020 р. майже в 1,5 – 2 рази. Це узгоджується з прогнозом до 2020 р. компанії Tesla щодо зниження майже вдвічі діючих цін літій-іонних акумуляторів для домашніх PV-установок – до рівня 0,2 дол [141].

Питомі капітальні витрати для літій-іонних накопичувачів знизилися на 24% для використання в магістральних мережах і на 11% – для побутових споживачів. Найменший рівень капітальних витрат спостерігається для послуг з регулювання частоти, де мінімальні значення питомих витрат знизилися з 211 дол. США за МВт·год у 2015 р. до 190 дол. США за МВт·год у 2016 р.

Рівень витрат для проточних акумуляторів, що використовуються для магістральних мереж в умовах зміни часу споживання, у 2015 р. Перевищив 600 дол. за МВт·год та у 2016 р. витрати помітно знизилися.

8.3 Місце систем накопичення електричної енергії в системах Smart Grid

Важливим і новим системним фактором, який підсилюється в міру розвитку РГ, є широке залучення споживачів до процесу управління режимами ЕЕС, у тому числі за допомогою механізмів управління попитом (DR), розвиток та впровадження систем акумулювання енергії (Energy Storage System), новітніх технологій «розумних» систем обліку – Smart Metering, а також інших інноваційних технологій.

Впровадження технології Smart Grid також означає фундаментальну реорганізацію електроенергетичної галузі щодо використання накопичувачів енергії необхідної ємності для вирівнювання графіка навантаження, а також для забезпечення безперебійної роботи особливо важливих об'єктів;

Урядом Великобританії була опублікована Зелена книга «Нова промислова стратегія», яка наголошує на розвитку технологій накопичення та зберігання енергії для підтримки розвитку інтелектуальних енергетичних систем та електромобільної промисловості. Уряд ставить перед собою завдання зробити країну лідером в дослідженнях, проектуванні та розробці систем накопичення та зберігання енергії. Серед відібраних проектів неочікуваним було побачити проекти зберігання енергії, які забезпечать 3.2 ГВт або 6% всієї зарезервованої потужності. З них 500 МВт це нове будівництво промислових накопичувачів енергії [142].

Тим же часом у США компаніями Tesla, Altagas Ltd. і AES Corp вже побудовано три промислових накопичувача енергії на основі літій-іонних акумуляторів, кожен з яких за обсягами перевищує будь-який раніше побудованих батарейних накопичувачів. У сукупності їх потужність відповідає приблизно 15% потужності накопичувачів, встановлених в 2016 р. у всьому світі. Найбільший з об'єктів – це накопичувач від AES Corp. потужністю 30 МВт і ємністю 120 МВт·год (на основі елементів Samsung). Важливо, що всі проекти були реалізовані в стислі терміни менш, ніж за шість місяців, особливо відзначилася Tesla, яка спроектувала і побудувала промислову систему

зберігання енергії лише за три місяці. Це одна із значних переваг батарейних накопичувачів.

Знакові зміни відбулися у 2016 році і в секторі побутового споживання та зберігання електроенергії. В Австралії встановлена потужність побутових систем зберігання сонячної енергії зросла в 13 разів, за рік було встановлено 6 750 систем зберігання це означає, що кожного робочого дня в країні встановлювалося 27 систем, а кожної робочої години відповідно – 3.3 системи. До кінця поточного року країна планує довести встановлену потужність систем зберігання енергії до 200 ГВт-год. А нещодавно в тестовому режимі в країні запрацювала перша децентралізована біржа з торгівлі електроенергією. Це означає, що незабаром австралійські домогосподарства-власники сонячних панелей і батарей зможуть об'єднатися між собою для створення «віртуальних» електростанцій та продавати надлишки електроенергії в мережу. Тобто, домогосподарство отримало професійний майданчик, який надає їм можливість «почати думати та діяти по-новому» як продуктивний споживач, споживач-професіонал (prosumer) та своїми діями впливати на стабільність енергосистеми, і це новий потужний гравець енергоринку, значення якого важко переоцінити. Для нашої країни це може стати економічним базисом реальних демократичних перетворень – формування мережевого суспільства замість застарілого консервативного дизайну ринку, де правлять великі енергетичні монополії.

Наразі, Німеччина має один з найбільших в світі ринків побутового зберігання електроенергії (можливості побутового зберігання електроенергії становлять близько 70 МВт, в країні налічується більше 20 000 систем зберігання енергії). Швидке зниження цін на системи зберігання та державна програма стимулювання їх розвитку роблять в Німеччині привабливою для широкого застосування технологію «сонячна енергія + збереження». За аналітичними даними протягом наступних 5 років ринок побутового зберігання електроенергії в країні зросте в 11 разів з точки зору потужності накопичувачів [143].

Менш, ніж за рік Tesla удосконалила свою настінну акумуляторну батарею, подвоївши її потужність та зменшивши розмір на третину, та запропонувала

ринку модель PowerWall2, її ціна є вдвічі нижчою від попередньої. Встановлення такої акумуляторної батареї 14кВт·год до вже інсталюваної сонячної системи коштуватиме \$10000 в той час, як встановлення повної комплектації «сонячна енергія + збереження» починатиметься з \$15000.

Інший виробник - корейська LG Chem – вже пропонує повну комплектацію «сонячна енергія + збереження» з акумуляторною батареєю 6.4 кВт·год за \$ 5900 (а в квітні минулого року лише одна батарея коштувала \$ 7500). Наразі виробник також пропонує домогосподарствам літій-іонний акумулятор 9.8 кВт·год.

FERC виділила два види систем накопичення та зберігання енергії: Electric Storage Resource (ESR) ресурс електричного зберігання та Distributed Energy Resource (DER) розподілений енергетичний ресурс.

ESR здатний отримувати електроенергію з мережі та зберігати її для пізнішої віддачі в мережу незалежно від того, де в енергосистемі розміщений цей ресурс. Він включає всі види технологій зберігання електроенергії незалежно від їх розміру, носія (акумуляторні батареї, стиснене повітря, гідроакумулювання), а також розміщення (чи в системі електропередачі, чи в системі розподілу).

DER, в свою чергу, – це джерело або споживач енергії, які знаходяться в системі розподілу (тобто будь-яка підсистема) або «за лічильником» споживача. Цей ресурс може включати ресурс електричного зберігання, а також розподілену генерацію, акумулювання теплової енергії, електромобілі [144].

Ми також спробували охарактеризувати нового для нашої енергосистеми суб'єкта та гравця Energy Storage. Модель передбачає здатність енергосистеми з допомогою Energy Storage покривати протягом року до 35% попиту на електроенергію, тобто кожен третю кіловат-годину, що споживатиметься, 17% при цьому або кожна шоста кіловат-година споживання покриватиметься за рахунок акумуляторних батарей. Для порівняння зараз в Україні за рахунок ГАЕС в години нічного провалу акумулюється близько 14% електроенергії, а в години максимального навантаження покривається близько 8% споживання.

Відповідно до поглядів закордонних енергетичних експертів основними технологіями Energy Storage, на які опиратиметься українська енергосистема

100% ВДЕ будуть акумуляторні батареї, що забезпечать коротко - термінове зберігання електроенергії, та технологія Power-to-Gas, що буде значним ресурсом сезонного зберігання після 2035 року. Після 2040 року, тобто вже майже через 20 років, в українській енергосистемі домінуватимуть сонячні фотоелектричні системи та акумуляторні батареї (у тому числі у формі взаємодії електротранспорту і електромережі (V2G connections)).

Україна та весь світ вже сьогодні стоїть перед глобальним викликом накопичення та збереження енергії.

Для забезпечення стабільної роботи ОЕС – об'єднаної енергетичної системи України, а також для демонополізації, декарбонізації та діджиталізації енергетики гостро постало питання створення та запуску проектів з накопичення, зберігання та балансування енергії.

Саме серйозний дисбаланс між виробництвом та споживанням електричної енергії і дав поштовх швидкому розвитку сучасних технологій накопичення та трансформації енергії. Інноваційним та технологічно прогресивним втіленням зазначених технологій є BESS (Battery Energy Storage System) - акумуляторна система накопичення електричної енергії.

Тому в "МХП" розпочали реалізацію концептуального проекту будівництва Energy Storage у Вінницькій області в рамках створення енергокластеру МНР Energy Hub [145].

8.4 Огляд сучасних розробок систем накопичення електричної енергії

Компанії виробники промислових систем накопичення енергії та перспективні розробки.

Компанія Tesla стала одним із світових лідерів в області створення систем зберігання енергії. Сьогодні Tesla пропонує на ринку два різновиди таких систем: Powerwall та Powerpack. Перша може використовуватися у житлових і невеликих офісних приміщеннях, друга – для роботи на підприємствах з відносно великими потужностями і для значної кількості споживачів. Потужність промислової Powerpack становить 100 кВт, з конструктивною можливістю об'єднувати окремі

елементи у великі системи потужністю до 100 МВт. Орієнтовна вартість складатиме 250 дол. за 1 кВт. Компанією завершено будівництво системи зберігання енергії у Південній Австралії, потужністю 100 МВт / 129 МВт·год. Мета компанії Tesla – наростити до 2020 р. поставки на світовий ринок систем акумулювання енергії сумарною ємністю до 15 ГВт·год на рік [146].

Компанія AES (технологія Advancion) останні 8 років активно працює у 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. Сьогодні компанією реалізовано масштабні проекти у Великобританії, Чилі та Нідерландах. У 2016 р. введено ряд об'єктів в Індії, у Домініканській Республіці і на Філіппінах.

Програмне забезпечення AES дозволяє об'єднувати різні джерела генерування електроенергії, що особливо важливо при пікових навантаженнях. Одна з переваг рішень, що пропонує AES – модульний принцип побудови, який дозволяє нарощувати потужність у міру зростаючих потреб користувача. Наприкінці 2015 р. компанією випущено 4 версію технології Advancion, що легко інтегрується з уже діючими програмними продуктами диспетчеризації енергозабезпечення. Співпраця AES з провідними виробниками промислових акумуляторів дозволяє істотно знизити витрати і час розгортання потужних систем зберігання енергії.

Компанія Panasonic (технологія Smart Towns) один з найбільших у світі виробників потужних накопичувальних батарей, великі обсяги виробництва дозволяють компанії реалізовувати продукцію за конкурентною ціною. Проект компанії Smart Towns — спрямовано на реалізацію нових підходів у накопиченні і розподіленні електричної енергії за технологією: «сонячні батареї + акумулятор».

Компанія NGK Insulators (технологія сірчано-натрієвих батарей). Японська компанія NGK Insulators однією з перших вийшла на світовий ринок систем накопичення та зберігання електроенергії з технологією сірчано-натрієвих батарей з рідким електролітом. Сьогодні сумарна потужність акумуляторів NGK

Insulators, встановлених у всьому світі, становить близько 3 ГВт. Завдяки особливостям 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 електроенергії, ніж акумулятори з рідким електролітом, останні ще досить довго будуть зберігати провідні позиції в якості альтернативної технології для довготривалого накопичення електроенергії. Зокрема, компанія виграла тендер на будівництво потужних систем акумуляування енергії (35 МВт – 280 МВт) в Італії.

Компанія S&C Electric (технологія Pure Wave S & C) має більш ніж віковий досвід у проектуванні і будівництві інженерних комунікацій, захисту і створенні систем управління для електричних мереж. Сьогодні 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. Зокрема, компанією в Техасі об'єднано в єдину мережу 4 електричних мікромережі, що мають різні джерела генерації, з системою зберігання електроенергії. Крім того, компанією розроблено одну з найбільших систем зберігання електроенергії у Великобританії. Ще один проект потужністю 7 МВт – Half Moon Ventures, у м. Мінстер, штат Огайо [147].

Компанія Younicos (технологія YCube). Німецько-американська компанія Younicos є одним з провідних постачальників програмного забезпечення для систем зберігання енергії і системних інтеграторів. Компанія займає провідні позиції у сонячній і вітряній енергопромисловості Німеччини. Компанією розроблено ряд програмно-проектних рішень для багатьох масштабних проектів у Німеччині. Компанія пропонує на ринку власне обладнання для накопичення енергії під маркою Y.Cube. Особливість Y.Cube – це модульна система, яка може підключатися до різних джерел генерації електроенергії, 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 електроенергії на більш стислі терміни). При цьому програмне забезпечення дозволяє оперативно налаштувати схему управління системою зберігання енергії.

Компанія RES (технологія RESolve). Багатопрофільна проектна компанія RES стала однією з ініціаторів проектування та будівництва потужних систем зберігання – 88 МВт, а також 200 МВт. В основу проектів компанії покладена власна система RESolvecontrol, яка дозволяє інтегрувати в єдину систему пристрої зберігання електроенергії з джерелами генерації (сонячними батареями, вітрогенераторами тощо). Система RESolve автоматично визначає оптимальний режим роботи, з мінімізацією ризиків, раціонально перерозподіляючи накопичену енергію для отримання максимального прибутку від оптового продажу енергії у загальну енергосистему. Сьогодні компанія реалізувала близько 10 власних проектів [147].

Міжнародні дослідження в області «чистої» енергетики визначають особливу роль та необхідність подальшого розвитку промислових накопичувачів енергії. Відмічено майже 50%-ве зростання ринку накопичувачів у 2016 році, що не відносяться до ГАЕС, що свідчить про перспективу широкого впровадження потужних промислових накопичувачів енергії у найближчі роки. Загальна потужність встановлених накопичувачів енергії для стабілізації роботи мережі та допоміжних послуг (ancillary services), за прогнозами американської консалтингової компанії Navigant Research, до 2026 року досягне 93,8 ГВт.

При цьому заміщення традиційних (вертикально струк-турованих) способів генерації і розподілу масштабною децентралізованою генерацією потребує розвитку так званих інтелектуальних (на основі концепції Smart Grid) систем енергозабезпечення [1-9]. В Україні керування генерацією здійснюється поки що за командами диспетчерської служби, яка складає баланс потужності енергосистеми згідно з пропозиціями енергогенеруючих компаній та енергозбутових організацій, проводить резервування потужності, складає графіки генерації електроенергії, веде облік виробленої та спожитої електроенергії, розраховує вартість виробленої енергії та ін. [10]. Очевидно, що таке регулю-

вання попиту/пропозиції електроенергії, по-перше, не відповідає економічній суті універсальної економічної моделі «попиту/пропозиції», яка описує процес ціноутворення на ринку. По-друге, урівноважування попиту/пропозиції «на добу вперед», що відповідає описаній схемі керування генерацією, є неефективним енергетично і економічно [147].

Ефективно інтегрувати зростаючі потужності децентралізованої генерації з різнорідними НВДЕ можливо на основі ІСЕЗ. Така інтеграція потребує надання кінцевим споживачам енергії функцій активного споживача. При цьому існуючі енергетичні системи, у тому числі електричні і теплові мережі, об'єднуються в межах інтелектуальних енергетичних систем.

При створенні в Україні ІСЕЗ, що безпосередньо пов'язано з інтеграцією до ЄС, слід враховувати ряд положень. По-перше, інтегруватися (наприклад, ОЕС України до ENTSO-E) доведеться не в сучасні, в майбутні (з горизонтом від п'яти років) енергетичні інфраструктури ЄС з домінуючою роллю ІСЕЗ. Сьогодні їх профіль тільки визначається і перед вітчизняним розробником постає завдання передбачити як характер, так і наслідки прийдешніх масштабних змін енергетики Заходу і розвинутого Сходу. При цьому структура енергетики в техніко-технологічному аспекті має бути перебудована. Відповідно з даними С.П. Денисюка [6], Smart Grid 3.0 базується не тільки на принципі децентралізованого керування, а ще й на принципі peer-to-peer (P2P), тобто рівноправності у контексті ІСЕЗ споживача і постачальника та інших учасників енергетичного ринку, що дозволить реалізувати так званий роумінг енергії, продаж/закупівлю енергії у будь-якого виробника, а виробнику продавати свою енергію будь-якому споживачу. У такий спосіб реалізується закон економіки про урівноваження «попиту та пропозиції».

По-друге, при модернізації національної енергосистеми слід виходити із сучасних і перспективних особливостей структури генерації енергії, енергоспоживання і енергетичного балансу саме України, а не інших (нехай і розвинутих) країн.

По-третє, при модернізації енергопостачання (енергопостачання у

широкому сенсі – теплопостачання й електропостачання) слід засвоїти закордонний досвід. При цьому на особливу увагу заслуговує аналіз розвитку ТНЕ, як ключової складової ІСЕЗ.

Характерною рисою сучасної енергетики є зростання частки децентралізованої генерації і, як наслідок, потреба в акумулюванні різних видів енергії (механічної, теплової, електричної, хімічної, електрохімічної, термохімічної, кінетичної, потенційної тощо) та в деяких випадках в її «ітераційній» трансформації. В країнах з високою часткою НВДЕ-генерації (наприклад, в Данії, Німеччині, Австрії) формуються окремі галузі високотехнологічних накопичувачів енергії [147].

У США ємність накопичувальних станцій щорічно подвоюється протягом останніх чотирьох років (рис. 8.2). За даними DoE (Міністерства енергетики США), світова сумарна потужність накопичувачів енергії досягла при-близно 200 ГВт. У ряді країн ресурс накопичувачів енергії (зокрема, їх потужність та сумарна ємність) є помітною часткою електроенергобалансу.

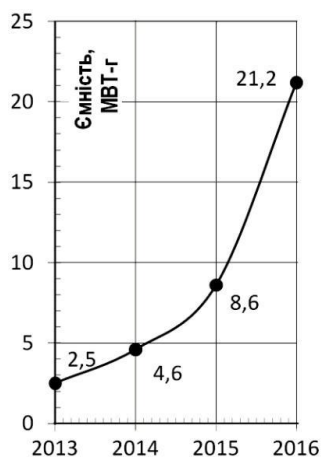


Рисунок 8.2 Динаміка загальної ємності накопичувальних пристроїв у США згідно з [15].

В табл. 1 наведено список найбільш важливих технологій накопичення енергії, упорядкований за ступенем їх поточної технологічно-комерційної готовності («зрілості», доступності) до впровадження. Усі перераховані у таблиці технології перебувають на різних фазах життєвого циклу НДР – на дослідній,

впроваджувальній, натурній, демонстраційній, комерційній. Перелік ТНЕ в табл. 1 починається з ГАЕС – найбільш відомих та потужних засобів акумуляції, і закінчується пошуковою технологією термохімічного накопичення¹. Остання ще не вийшла за рамки пооди-ноких малопотужних і відносно дешевих лабораторних установок. Стадії розробок усіх інших технологій зберігання енергії, що розглядаються, розташовуються у діапазоні між вказаними технологіями.

Щодо аналізу ТНЕ, то на особливу увагу заслуговує підхід, згідно з яким вказані технології відображаються параметричною кривою в площині двох комплексних параметрів – «комерційно-технологічна зрілість» та «потреба у капітальних витратах, помножених на ри зики». Даний підхід було нещодавно запропоновано Б. Декуром, Р. Дебарре [16-17] при систематизації чис-ленних технологій одержання, накопичення Гідрогену та його подальшого розподілення і енергетичного споживання. Цей підхід поширився на всі види ТНЕ і застосовується в межах даної роботи [147].

Таблиця 8.1 Основні технології і засоби накопичення енергії за [14-24]

1	ГАЕС
2	Акумуляторні батареї Рb-кислотні
3	"Ямні" накопичувачі
4	Накопичення холодної води
5	Підземні накопичувачі
6	Побутові нагрівачі з накопичувачами ГВ
7	Накопичення енергії стиснутого повітря (CAES)
8	Акумуляторні батареї Na-S
9	Накопичення льоду
10	Маховики низькошвидкісні
11	Розплавлена сіль
12	Акумуляторні батареї на основі Li
13	Акумуляторні батареї проточні

14	Маховики високошвидкісні
15	Іоністори (суперконденсатори)
16	Надпровідниковий магнітний акумулятор (SMES)
17	Адіабатичний накопичувач енергії стисненого повітря (CAES)

Технології накопичення енергії:

Загальна інформація та її джерела. Створення THE та їх впровадження є, як вже відмічалось, пріоритетним завданням сучасних енергетичних секторів промисловості. Велику увагу цю-му питанню приділяє міністерство енергетики США (DoE), яке підтримує проект «DoE Global Energy Storage Database» (далі SDB-DoE) [15], що є докладним і ма-буть єдиним з певного погляду виданням. На серпень 2017 року SDB-DoE містила відомості про 1636 проектів і діючих об'єктів THE зі встановленою потужністю 193,293 ГВт із 76 країн та Антарктиди. База включає добре структуровані за 107 ознаками дані про кожний проект або об'єкт накопичення енергії. В SDB-DoE розглядаються п'ять основних типів накопичуваль-них технологій: електрохімічна, електромеханічна, накопичення теплоти, накопичення Гідрогену і гідроаккумулявальна електростанція (ГАЕС). Вказана база даних регулярно, але нерівномірно оновлюється.

Таблиця 8.2 Технології накопичення енергії та встановлена потужність відповідних накопичувачів (за даними SDB-DoE)

Тип або приклад		Кількість проектів N		Встановлена потужність	
		N	N/N _Σ , %	P _{вст} , МВт	P _{вст} /P _Σ , %
1.	Електрохімічна (Li-іонна, Pb-кислотна, Na-S,...)	993	60,7	3279	1,7
2.	Гідроаккумулявальна (на базі ГАЕС)	352	21,5	183800	95,1

3.	Накопичення теплоти (холоду)	206	12,6	3622	1,9
4.	Електромеханічна (стиснене повітря, маховики)	70	4,3	2616	1,3
5.	Накопичення рідкого H ₂	13	0,8	18	0,0
6.	Накопичення рідкого повітря	2	0,1	5	0,0
Разом		N_Σ=1636	100	P_Σ =193340	100,0

Класифікації технологій накопичення енергії

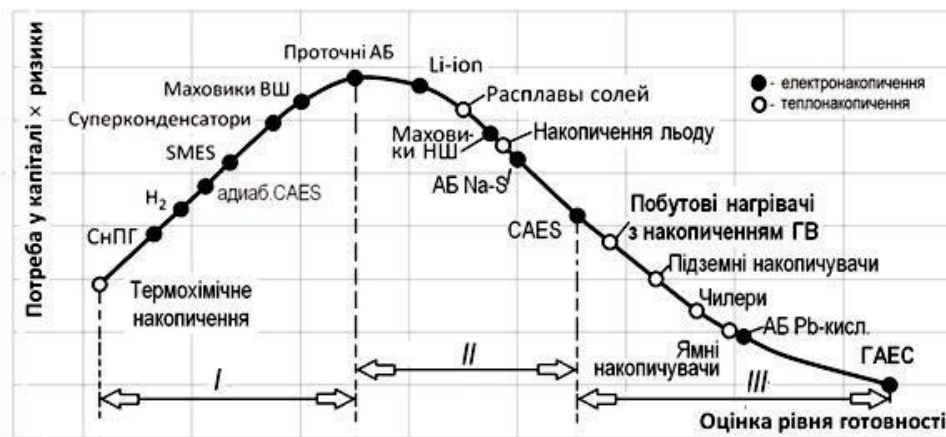
Класифікації ТНЕ внаслідок їх складної структури можуть будуватися за багатьма ознаками і запитами. Вдалою, як відомо, вважається систематизація за формалізованими причинно-наслідковими зв'язками. Цьому принципу систематизації відповідає вищезгадана не упорядкування сучасного спектру ТНЕ за двома комплексними факторами, запропонованими Б. Декурром і Р. Дебарре.

Перший фактор – фактор комерційної зрілості», виражає готовність розробки до впровадження. Слід зазначити, що вказана «Оцінка рівня готовності» ТНЕ є не тільки показником її технологічної «зрілості», але й рентабельності використання [147].

На вертикальній осі рис. 8.3 відображаються капітальні інвестиційні витрати на впровадження ТНЕ з врахуванням ризиків різної природи. Тобто на цій осі представлено скориговані фактором ризиків приведені капітальні витрати. Саме вказані витрати слугують певним інтегрованим індикатором при дослідженні, розробці, випробуванні, атестуванні та доведенні розробки до

впровадження.

Вартість технологій, які відповідають першій зоні, визначається витратами на створення лабораторного або експериментально-го обладнання, моделювання та проведення комплексу досліджень. В цій зоні налічуються вісім ТНЕ, а саме: технології термохімічного накопичення, синтезу при-родного газу (СнПГ), накопичення Гідрогену як продукту електролізу, адіабатичного накопичення енергії стис-неного повітря (CAES), надпровідникового магнітного акумулювання (SMES), технології на базі іоністорів (суперконденсаторів), високошвидкісних маховиків та проточного акумулятора.



Рисунком 8.3 Крива «зрілості», або розподіл технологій накопичення енергії в площині двох факторів – фактору «комерційно-технологічної зрілості» (вздовж осі «Оцінка рівня готовності») та фактору капітальних витрат і ризиків (вісь ординат), за [16-17, 19-20]: АБ – акумуляторна батарея; ВШ та НШ – високо- та низькошвидкісні (маховики); СнПГ – синтетичний природний газ; CAES (Compressed Air Energy Storage) – накопичувач енергії стиснутого повітря; SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) – надпровідниковий магнітний акумулятор; I – зона ТНЕ, які знаходяться у фазі НДР і ще не тестовані на предмет практичного використання в реальних умовах; II – зона ТНЕ, які знаходяться у фазі тестування в демонстраційних та пілотних проектах; III – зона ТНЕ, які мають комерційне застосування; ○ – ТНЕ з накопиченням теплової енергії; ● – ТНЕ з накопиченням електричної енергії.

Згідно з даними, наведеними на рис. 8.3, в межах зони I більшому рівню готовності технології відповідають більші потреби у витратах, скориговані

фактором ризику. Дійсно, технології з низьким рівнем готовності перебувають на стадії дослідження та лабораторних випробувань, що здійснюються відносно невеликим коштом. Більш високий рівень готовності ТНЕ (область зони I, наближена до максимуму кривої «зрілості» проектів) характеризується значними витратами, які сягають максимуму на межі зон I і II. Це пов'язано з тим, що вартість робіт за такими проектами з їх наближенням до стадії виготовлення натурних та промислових зразків суттєво зростає.

За результатами робіт на цьому етапі (зона I на рис. 4) приймаються рішення щодо подальших планів за проектом. А саме, робиться висновок відносно переведення проекту на стадію промислової апробації в реальних умовах, стадію його удосконалення або консервації. Тобто в решті решт приймаються рішення щодо перспектив комерціалізації проектів.

У цілому технології зони I характеризуються відносно високими ризиками і порівняно невеликою інноваційною привабливістю. При цьому в межах даної зони кількість інноваційних пропозицій зменшується в напрямку від максимуму кривої «зрілості» до мінімального значення готовності проекту на початку даної зони. Так, за даними SDB-DoE, наведеними в табл. 2, в світі налічується 13 проектів щодо технології одержання Гідрогену і лише два проекти щодо одержання синтетичного природного газу. Звертає на себе увагу технологія термохімічного накопичення, що відповідає початку зони I на рис. 4. Перспективи її практичного використання стримуються надто високою вартістю відповідного демонстраційного проекту та невизначеністю майбутньої прибутковості. Слід однак зазначити, що розробка науково-технічних засад даної технології привертає увагу наукової громадськості, про що свідчить значна кількість публікацій [25].

У зоні III (рис. 4) розташовані «зрілі» та відлагоджені ТНЕ. Їх відмінною рисою є те, що вони вже мають широке розповсюдження і сталий комерційний інтерес, тобто характеризуються не тільки технологічною, а ще і «бізнесовою зрілістю». Ризики щодо цих технологій відносно невеликі, питома вартість їх впровадження не перевищує середньогалузевих для енергетики значень, термін окупності є цілком прийнятним, а фінансування проектів – доступним не тільки

для державних, але й для інвестиційних фондів [147].

Зона II за основними ознаками є перехідною між зонами I та III. Її утворюють ТНЕ, які вже перебувають на стадії непоодиноких демонстраційних та пілотних проектів і реалізовані в виробничих умовах. За певних обставин вони можуть приносити відчутний прибуток. Успішні ТНЕ зони II відрізняються тим, що їх питома вартість у часі падає, а відтак, доступність зростає. Відповідно на рис. 4 положення цих технологій зміщується вправо вздовж осі «Оцінка рівня готовності». Яскравим прикладом таких успішних технологій є Li-іонні акумуляторні батареї. Їх застосування у багатьох сферах носить серійний або навіть ма-совий характер. Так, масовим є використання Li-іонних батарей у інформаційно-технологічному секторі – ноутбуках, стільниковому зв'язку тощо. Наприклад, за першу половину 2017 року телефонів Iphone 6 вироблено вже 10 млн. штук. Їх сумарна постійна потужність впродовж стандартного навантаження, яке тестується протягом 15 хвилин, оцінюється ≈ 280 МВт. Ще одним прикладом застосування Li-іонних батарей є електромобілі. Лінійка електромобілів вже нараховує 5...6 серійних брендів, а на кінець 2016 року їх загальне виробництво досягло 2 млн. При середній ємності автомобільної батареї 50 кВт·год, їх сумарна постійна потужність впродовж 15 хвилин для наявного автопарку відповідає 400 ГВт. Тим не менш спроби створити Li-іонну батарею, прийнятну для енергопотреб домогосподарства, поки що не стали успішними. Обіцяна у 2015 році I. Маском «Гігафабрика», призначена для масового випуску 7-10 кВт·год «Тесла» – подібних акумуляторів для домогосподарств, не тільки не працює, а її будівництво навіть не перейшло до активної фази. Очевидно, ціни на такі батареї при відносно малому терміні їх працездатності, все ще не конкурентні у порівнянні з традиційними засобами енергозабезпечення домогосподарств.

З аналізу даних, наведених на рис. 4, випливає також, що більшу частину розроблюваних технологій становлять технології прямого накопичення електричної енергії – 13 з 20 технологій. Щодо технологій накопичення теплової енергії, то на кривій «технологічної зрілості» їх налічується лише 7. При цьому майже всі технології, пов'язані з накопиченням теплової енергії, відповідають

зонам II і III кривої «зрілості», тобто перебувають на стадії практичної реалізації. Переважну ж більшість технологій, що відповідають зоні I даної кривої, тобто пошуковим НДР, становлять розробки електроаккумуляторів [147].

Загальне уявлення про спектр найбільш досліджених ТНЕ надає рис. 5. За принципами накопичення енергії звичайно виділяють п'ять типів технологій, які в свою чергу розподіляються на дві категорії. Першу з них складають технології прямого накопичення електричної енергії з можливістю її подальшого використання. До даної категорії входить два типи технологій: елек-трохімічна технологія, яка включає класичні та новітні технології акумулювання енергії електрохімічної природи – свинцово-кислотні, Li-іонні, натрієво-сірчані аккумулятори, проточні редокс-аккумулятори тощо, та електрична технологія, в якій енергія накопичується безпосередньо в іонисторах (суперконденсаторах), в надпровідникових магнітних аккумуляторах SMES та ін.

До другої категорії – непрямого накопичення електричної енергії – відносяться інші три типи ТНЕ – механічні, хімічні та термічні. Тут тимчасові надлишки електричної енергії утилізуються шляхом їх перетворення в інші форми енергії, наприклад, у теплоту, хімічну енергію горючих речовин тощо. В деяких випадках можливе рекурентне одержання електричної енергії (наприклад, в ГАЕС).

В технологіях накопичення енергії механічного типу «надлишкова» енергія використовується для таких цілей: а) накопичення потенціальної енергії шляхом перекачування води до верхнього басейну ГАЕС; б) стиснення повітря (CAES – Compressed Air Energy Storage), у тому числі в адіабатичному варіанті, або його зрідження (LAES – Liquid Air Energy Storage); в) акумулювання кінетичної енергії при розкрутці супермаховиків.

Щодо ТНЕ хімічного типу, то тут йдеться про такі технології, як накопичення Гідрогену, одержаного при електролізі води, а також синтетичного метану, аміаку, метанолу тощо з їх подальшим паливним або іншим використанням.

Технології накопичення енергії термічного типу характеризуються

акумулюванням безпосередньо теплової енергії у явній формі (гаряча вода, високотемпературні рідини, розплави солей тощо) або у прихованому вигляді (теплота фазового переходу, гідратація, розчинення та ін.). До технологій даного типу відносяться технології, що базуються на використанні оборотних хімічних реакцій з яскраво вираженим термічним ефектом.

Як вже зазначалося, згідно з базою даних SDB-DoE в світовій енергетичній практиці нараховується понад 1600 проектів, що стосуються різних типів акумулювання енергії. Вони складають ринок технологій зберігання енергії, який можна упорядкувати на три групи за ємністю і часом реакції. Крім того можна виділити дві області застосування цих технологій (рис. 8.4) [147].

Акумуляторні батареї, іоністори та маховики утворюють групу короткотермінових накопичувачів енергії. Їх призначення гасити коливання та флуктуації частоти генерації електроенергії.

Групу середньотермінових накопичувачів складають акумуляторні батареї, зокрема, проточні редокс-акумулятори, ГАЕС, а також термохімічні накопичувачі. Вони беруть участь у стабілізації добових циклів енергопостачання. До групи довготривалих відносяться теплові накопичувачі та перетворювачі електроенергії в горючі гази (Гідроген, P2G та ін.). Як приклад тепло-вих накопичувачів даної групи можна навести сезонні акумулятори ямного типу об'ємом до 100 тис. м³, будівництво яких характерно для Данії, де значною є частка ВЕС.

На завершення слід відзначити, що наведений аналіз та класифікації ТНЕ покликані сприяти орієнтації в їх широкому спектрі та допомагати в обґрунтованому виборі необхідних технічних рішень.

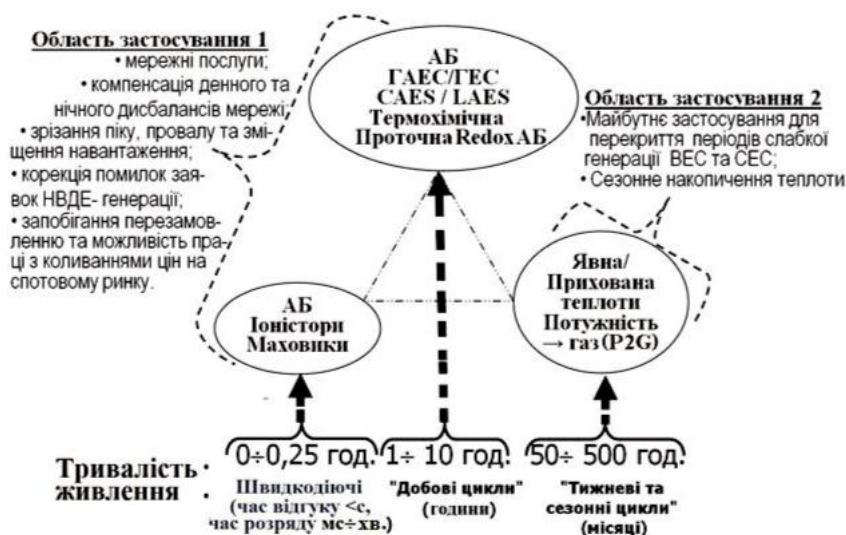


Рисунок 8.4 Часові характеристики та області застосування трьох груп технологій і засобів накопичення енергії.

Огляд наявних проектів технологій акумулювання тимчасових надлишків енергії згідно з базою даних SDB-DoE (понад 1600 проектів) показав, що останнім часом найбільш бурхливо розвиваються технології електрохімічного акумулювання (60,7% проектів); стійкий інтерес викликають гідроакумулювальні технології (21,5 % проектів); значна увага приділяється також технологіям накопичення теплоти (12,6 %) [147].

Контрольні питання до розділу 8

1. Які сучасні тенденції розвитку систем накопичення електричної енергії у світі?
2. Які сучасні тенденції розвитку систем накопичення електричної енергії в Україні?
3. Які загальні характеристики Smart batteries?
4. Яке місце займають системи накопичення електричної енергії в системах Smart Grid?
5. Охарактеризуйте сучасні розробки систем накопичення електричної енергії?

Список використаної та рекомендованої для користування літератури

1. Праховник А.В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения – К. : «Освіта України», 2007. – 464с.
2. Альтернативные энергоносители / М.В. Голицын, А.М. Голицын, Н.В. Пронина; Отв. ред. Г.С. Голицын. – М. : Наука, 2004. – 159 с.
3. Макаровский С.Н. Особенности работы электростанций на нетрадиционных возобновляемых источниках энергии и пути повышения эффективности // Гидротехническое строительство. – 2001, – №1, – С. 33–36.
4. Лабейш В. Г. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / В.Г. Лабейш. – СПб. : СЗТУ, 2003. – 80 с.
5. Источники энергии. Факты, проблемы, решения. – М. : Наука и техника, 1997. – 110 с.
6. Пендзин О. Аналіз сучасного стану паливно–енергетичного комплексу України //Євроатлантикінформ. – 2006. – № 2. – С. 17–26
7. World Energy Outlook –2019, OECD/IEA, Paris.
8. Енергетична стратегія України на період до 2035 р. // Сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України: [Електронний ресурс]: <http://mre.kmu.gov.ua>.
9. С.М. Бойко, Д. А. Михайличенко, С. В. Вирвикишка Актуальність впровадження концепції активного споживання електричної енергії в умовах ГВК Матеріали XIII міжнародна научна практична конференція «ключові въпроси в съвременната наука - 2017» Volume 11: Технически науки. София .«Бял ГРАД-БГ», 2017 S. 38-40.
10. Шахтный подземный транспорт: справочное издание. – В 2-х т. – Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт / Ю.Ф. Бутт, В.Б. Грядущий, В.Л. Дебелый, А.Н. Коваль, А.Л. Фурман, В.М. Щука, В.А. Яценко // Под общ. ред. Б.А.Грядущего. – Т.1. – Донецк: «ВИК», 2009. – 481 с.

11. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом. К.: Техніка, 2009. – 385 с.

12. Синчук О.Н. Перспективы развития шахтных (рудничных) электровозов с энергосберегающими видами тяговых электроприводов / О.Н. Синчук, С.В. Лебедин, И.О. Синчук, О.О. Удовенко, О.В. Пасько // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2006. – № 8 (102). – С. 83-92.

13. Синчук О.Н. Импульсные системы управления и защиты на рудничном электровозном транспорте / Синчук О.Н, Чумак В.В, Ершов О.В. – К.: «АДЕФ – Україна», 1998, – 280 с.

14. Електрифікація гірничого виробництва. Підручник для ВНЗ: у 2-х т. – Вид. 2-ге, перероб. та допов./ За ред. Л.О. Пучкова і Г.Г. Півняка. – Д.: Нац. гірн. ун-т, 2010. – Т.2. – 599 с.

15. Пугачёв Е.В. Системы шахтного электрооборудования с аккумуляторными источниками питания. Учебное пособие / Кузбасский политехнический институт – Новокузнецк, 1966. – 90 с.

16. Степаненко В.П., Ванцлафф В., Дайнека Р. Разработка и испытание шахтных контактно-аккумуляторных электровозов // Уголь. – 1986. – №12. – С. 32-33.

17. Синчук О.Н. Шахтный контактно-аккумуляторный электровоз / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, П.К. Саворский, Н.Н. Долгий // Горный журнал. – 1988. – №6. – С. 22-25.

18. Синчук О.Н., Гузов Э.С., Рудничная откатка контактно-аккумуляторными электровозами с управлением по системе многих единиц. Изв. Вузов. Горный журнал. №7, 1980. – С.104.-106.

19. Lane White. New haulage lever at Kiruna, Sweden, has massive capacity. – Mining Journal. – 1978, vol 119, N6, 112 p.

20. Синчук О.Н. Синергетическая система асинхронного электропривода контактно-аккумуляторного двухосного электровоза / Д.А. Шокарев, И.О.

Синчук. // Научно-технический сборник «Электромеханічні і енергозберігаючі системи» – Кременчуг – № 3/2011 (14) – с.31 – 34.

21. Hans-Natting Jochens Elektrische Grubenlokomotive EL 51 mit Pulsstellerantrieb und Mikroprozessor kompaktsteuerung. LEW – Nachrichten, 41. – 1989. – P.10-11.

22. Shultz L., Van Wyk D., Dunford W.S., Pzest R.B., Landy C.F. An inverter and induction motor traction drive underground mining's Locomotives. // Elek. Bahnen. – 1990. – 88. №3. – P.145-148.

23. Brunnecker. Drehstromtechnik für Stadt - und Strassentriebwagenan Beispiel des Stadtbahnwagens M der Verkehrsbetriebe Mulheim/Ruhr // Stadtverkehr. – 1979. – Bd 24. – N 2. – S. 80 – 83.

24. Ciebow G., Steller G. Betriebserprobung des Drehstromzuges der Berliner Verkehrs – Betriebe (BVG) // Tech. Mitt. AEG. Telefunken 67. – 1977. – N 7. – S. 311 – 316.

25. Moser R. Vergleichende Studie über die verschiedenen elektrischen Traktions – motore. Typen in ihrem spezifischen Anwendungsbereich // Brown Boveri Mitt. – 1978. – Bd 65. – N 12. – P. 795 – 810.

26. EGL 160. Batterielokomotiven Typ EGL 160 2 “System Milles” der firma Diema. (ETR: Eisenbahntechn. Rgsch). – 1983, 32, №12, 863-864 p.

27. Hahn. Karl; Verfahren zur Regelung der Antriebe – order Bremskraft an der Haftreibungsgrenze der Räder. Licentua Patent-Verwaltungs-GmbH. MKU B60, L 3/10, B61 c 15/00.

28. Гуманюк М.Н., Шкварин Ю.А., Солодовник А.И. Автоматизация маневрового аккумуляторного электровоза рудничного исполнения, «Научные труды Института автоматики», Киев, 1973. – С.67-74.

29. Волотковский С.А. Опыт эксплуатации рудничных контактных электровозов с импульсной системой управления / С.А. Волотковский, Ю.С. Ремха, В.Х. Пироженко и др. // Горный журнал. – 1976. – № 7. – С. 51-53.

30. Удовенко О.А. Энергосберегающая система тягового электропривода рудничного аккумуляторного электровоза: диссертация на соискание ученой

степени кандидата технических наук / Удовенко О.А. – КривойРог, Криворожский технический университет, 2004. – 195 с.

31. Rosenberg S. A., Dewan S.B. An inverter/cycloconverter system for variable frequency, variable voltage, ac power supplies // IEEE / IAS Intern. Semiconductor power Converter Conf. Lake. Buena Vista, Fla, 1977. – New York, 2003. – p. 247 – 255.

32. Изосимов Д.Б. Некоторые особенности проектирования тяговых асинхронных двигателей. Ч.2. «Электротехника». М.: Россия. - №4, 2012. – С. 46 – 52.

33. Гетьман Г.К. Теория электрической тяги. Монография в 2 т. / Г.К. Гетьман. – Днепропетровск: Изд. Маковецкий Ю.В., 2011. т.2. – 364 с.

34. Шидловський А.К. Енергозбереження і силова електроніка в електроенергетиці / А.К. Шидловський, В.Б. Павлов // Техн. електродинаміка. Тем. Випуск. Силова електроніка та енергоефективність.– К.: Інститут електродинаміки НАН України. – 2006. – Част. 1. – С. 3-8.

35. Материалы сайта: www.asea.com

36. Материалы сайта: www.siemens.com

37. Материалы сайта: www.abb.com

38. Материалы сайта: www.wikipedia.org

39. Материалы сайта: www.serminsa.com

40. Материалы сайта: www.alstom.com

41. Материалы сайта: www.loric.com

42. Материалы сайта: www.hitachi.com

43. Ренгевич А.А. Показатели рейсовой работы рудничных контактных электровозов / А.А. Ренгевич // Вопр. рудничного трансп. – 1961. вып. 5. – С. 118-124.

44. Bertil Oberg. Computer-controller ore transformation at the LKAB mine in Kiruna. – Sweden Information of ASEA. – 1979. P.212

45. Хечинашвили А.В. Система контроля и управления источником энергии тягового привода электромобиля / Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М: 2006, 19с.

46. Выпанасенко С.И. Система заряда аккумуляторной батареи и питания вспомогательных нагрузок контактно-аккумуляторного двухосного рудничного электровоза / О.М. Синчук, Д.А. Шокарев // Научно-технический сборник «Гірнична електромеханіка та автоматизація»: Днепропетровск – 2011. – №5. – С. 112-119.

47. Гвоздицкий Г. Источник питания повышенной мощности. – Радио, 1992, – №4, С. 43, 44.

48. Nachrüstung von Ladestationen fue NC-Akkuwerkzeuge mit dem Ladecontroller TEA1101. – Funk Amateur, 2000, № 2, p. 164-167.

49. "Интеллектуальное" зарядное устройство для Ni-Cd аккумуляторов. – Радио, 2001 .№ 1. – С.72.

50. Григорьев Б. Алгоритм быстрой зарядки аккумуляторов. - Радио, 2001, № 8, с. 38.

51. Boshboom W. Batteries recharge characteristics under TEA1101 charge management. Report No: NPO/AN9301.

52. Battery monitor for Ni-Cd and Ni-MH chargers. Philips Semiconductors - preliminary specification. Dec. 1992.

53. Inteligentna ladowarka akumulatorow Ni-MH i Ni-Cd. – Radioelectronic Audio Hi-Fi-Video, 1998, № 7-8. – s. 21-26.

54. Косенко С. "Интеллектуальное" зарядное устройство для Ni-Cd аккумуляторов. – Радио, 2004, – № 5, – с. 32-35.

55. Литий-ионные аккумуляторы ("За рубежом"). – Радио, 2001, – № 7, – с. 44, 45.

56. Семенов А.Д., Артамонов Д.В., Брюхачев А.В. Идентификация объектов управления: Учебн. пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос.ун-та, 2003. – 211 с

57. Stephan J., Bodson M., Chiasson J. Real-Time Estimation of the Parameters and Fluxes of Induction Motors // IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 30, No.3, 1994,– pp. 746-758.
58. Система управления и диагностики электровоза ЭП10 / Под ред. С. В. Покровского. – М.: Интекст, 2009. – 356 с.
59. Robert A. Huggins. Energy Storage. — Springer Science & Business Media, 2010-09-01. – 424 с.
60. Packing some power // The Economist. – 2012.
61. Wayback Machine. web.archive.org. 2014-08-01.
62. Wayback Machine. web.archive.org. 2012-09-05.
63. Wald, Matthew L. (2010-07-27).
64. Gies, Erica (2012-10-01). A Storage Solution Is in the Air. The New York Times (en-US). 0362-4331.
65. Wayback Machine. web.archive.org. 2011-05-16.
66. Next-gen Of Flywheel Energy Storage | Product Design and Development. web.archive.org. 2010-07-10.
67. Nathanael Massey, ClimateWire. Energy Storage Hits the Rails Out West (en). Scientific American.
68. Energy-Storing Train Gets Nevada Approval (en). Fortune.
69. Akshat Rathi, Akshat Rathi. Stacking concrete blocks is a surprisingly efficient way to store energy (en). Quartz.
70. Wayback Machine. web.archive.org. 2016-03-04.
71. Braedstrup Solar Park in Denmark is now a reality!. web.archive.org. 2013-01-26.
72. Liangzhong YAO, Bo YANG, Hongfen CUI, Jun ZHUANG, Jilei YE. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. – 2016-10-01. – Iss. 4. – P. 519–528.
73. ScienceDirect. www.sciencedirect.com.

74. Capacitor cells - ELTON. web.archive.org. 2013-06-23.
75. Liquid storage of solar energy: More effective than ever before (en). ScienceDaily.
76. A. Belkin, A. Bezryadin, L. Hendren, A. Hubler. Recovery of Alumina Nanocapacitors after High Voltage Breakdown // Scientific Reports. – 04 20, 2017. – Т. 7, вып. 1. – С. 932.
77. Photovoltaic self-sufficiency of Belgian households using lithium-ion batteries, and its impact on the grid. www.sciencedirect.com.
78. Wald, Matthew L. (2010-07-27). Pushed Along by Wind, Power Storage Grows. The New York Times (en-US). 0362-4331.
79. Wald, Matthew L. (2014-04-21). Ice or Molten Salt, Not Batteries, to Store Energy. The New York Times (en-US). 0362-4331.
80. Jürgen Schmid. Renewable Energies and Energy Efficiency: Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy system (thesis) // Universität Kassel / Kassel University Press.
81. Scénario négaWatt 2011-2050 (fr). Association négaWatt.
- 82.
83. Деордиев С. С. Аккумуляторы и уход за ними. – К.: Техніка, 1985. – 136 с.
84. Источники энергии: Для широкого круга читателей / В. С. Лаврус (ред.).
85. Накопители энергии: Учеб. Пособие для вузов / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкевич; Под ред. Д. А. Бута.–М.: Энергоатомиздат, 1991.–400 с.: ил.
86. Эксплуатация и ремонт стартерных аккумуляторных батарея/ М.А. Дасоян, О. С. Тютрюмов, Е.С. Аранчук, К.И. Бирюк. - М.: Транспорт, 1977. -. 152 с.
87. Варыпаев В. Н. Химические источники тока: учеб. пособие для хим. – технол. спец. вузов / В. Н. Варыпаев, М. А. Дасоян, В. А. Никольский / Под ред. В. Н. Варыпаева. – М. : Высш. шк., 1990. – 240 с.

88. Технічна електрохімія 2: Хімічні джерела струму [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», спеціалізації «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів» / М. В. Бик, С. В. Фроленкова, О. І. Букет, Г. С. Васильєв; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 8,3 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 321 с.

89. Хрусталеv Д. А. Аккумуляторы. – М.: Изумруд, 2003. – 224с.: ил.

90. G. Girishkumar, B. McCloskey, A. C. Luntz, S. Swanson, and W. Wilcke, “Lithium-Air Battery: Promise and Challenges,” J. Phys. Chem. Lett. – 2010. Vol. 1 – P. 2193 .

91. Zhao, Y. An Aqueous Lithium-Iodine Battery with Solid Polymer Electrolyte-Coated Metallic Lithium Anode [Text] / Y. Zhao, N. B. Mercier, H. R. Byon // ChemPlusChem. – 2014. – Vol. 80, № 2. – P. 344–348.

92. Zhao, Y. Polymer Electrolytes for Lithium/Sulfur Batteries [Text] / Y. Zhao, Y. Zhang, D. Gosselink, T. N. L. Doan, M. Sadhu, H.-J. Cheang, P. Chen // Membranes. – 2012. – Vol. 2, № 4. – P. 553–564.

93. Бик М. В., Фроленкова С. В. Технічна електрохімія 2: Хімічні джерела струму [Електронний ресурс] : підручник для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», спеціалізації «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів» / М. В. Бик, С. В. Фроленкова, О. І. Букет, Г. С. Васильєв; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 321 с.

94. Білогуров В. А. Порівняння основних характеристик хімічних джерел струму різних електрохімічних систем. Сучасна спеціальна техніка № 3(50). – Київ, – 2017. – С. 124-134.

95. Варыпаев В. Н. Химические источники тока: учеб. пособие для хим. – технол. спец. вузов / В. Н. Варыпаев, М. А. Дасоян, В. А. Никольский / Под ред. В. Н. Варыпаева. – М. : Высш. шк., 1990. – 240 с.

96. Ефимов, О. Н. Новые материалы для литиевых аккумуляторов [Текст] / О. Н. Ефимов, Д. Г. Белов, Г. П. Белов и др. // Машиностроитель. – 1995. – № 3. – С. 24–28.

97. Кедринский И. А. Li-ионные аккумуляторы: учебник / И. А. Кедринский, В. Г. Яковлев. – Красноярск : «Платина», 2002. – 268с.

98. Кедринский, И. А. Химические источники тока с литиевым электродом [Текст] / И. А. Кедринский, В. Е. Дмитриенко, Ю. М. Поваров и др. – Красноярск: Изд. Краснояр. ун-та, 1983. – 247 с.

99. Корж А. О.. Метод десульфатизації свинцево-кислотних аккумуляторів: маг. / Київський політ. ін-т. – Київ, – 2018. – 132 с.

100. Скундин, А. М. Современное состояние и перспективы развития и исследований литиевых аккумуляторов [Текст] / А. М. Скундин, О. Н. Ефимов, О. В. Ярмоленко // Успехи химии. – 2002. – Т. 71, № 4. – С. 378–398.

101. Таганова А. А. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации: справ. / А. А. Таганова, Ю. И. Бубнов, С. Б. Орлов / СПб. : Химиздат, 2005. – 264 с.

102. Трасатти С. Измерение истинной площади поверхности в электрохимии // С. Трасатти, О. А. Петрий / Электрохимия. – М. : Наука, 1993. – № 4. – С. 557–575.

103. Шевченко С. Т. Закономірності формування нанопористих ZnO, C, C/ZnO/NiO для потенційного застосування у якості електродів літій-іонних акумуляторів : маг. / Сумський держ. ун-т. – Суми, – 2018. – 59 с.

104. Шелест М. Б. Основи будови та експлуатації акумуляторних батарей: навчальний посібник / М. Б. Шелест, П. І. Гайда. – Суми: Сумський державний університет, 2014. – 210 с.

105. 20. Щербань А. П., Ларін В. Ю. Принципи роботи та особливості використання літій-полімерних акумуляторів. Інформаційно-управляючі системи № 3/2(23). – Київ, – 2015. – С. 93-98.

106. Ярмоленко, О. В. Новые полимерные электролиты, модифицированные краун-эфирами, для литиевых источников тока [Текст]: автореферат дис. доктора хим. наук: 02.00.05 / О. В. Ярмоленко; Институт физической химии и электрохимии РАН им. А. Н. Фрумкина. – М., 2012. – С. 7–9.

107. Gabor Szorenyi. Innovation and energy regulation incl. ERRA Survey Report 2016, May 2016 [Online].available at: <http://library.erranet.org/>
108. István Táci. Overview of the Energy Storage Possibilities to Support the Electrical Power System: Research Paper to assist the ERRA Licensing and Competition Committee, July 2016 [Online]. – available at: <http://library.erranet.org/>
109. Morgan Stanley: Storage in the Utility Sector ‘Will Grow More Than the Market Anticipates’ [Online] // Greentech Media / 08.02.2017. – available at: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/morgan-stanley-deems-energy-storage-underappreciated-expects-big-growth-in>
110. Smart Grids (European Commission)
111. The NIST Smart Grid Collaboration Site NIST's public wiki for Smart Grid
112. Emerging Smart Multi-Use Grids Multiple use scalable wireless network of networks
113. Video Lecture: Computer System Security: Technical and Social Challenges in Creating a Trustworthy Power Grid, University of Illinois at Urbana-Champaign
114. Smart Grid: Communication-Enabled Intelligence for the Electric Power Grid
115. Кириленко О.В., Якименко Ю.І., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Перетворювачі параметрів електроенергії в Smart системах енергетики // Спец. випуск Праць Ін-ту електродинаміки НАН України (Матеріали I Міжн.ї наук.-техн. конференції «Інтелектуальні енергетичні си-стеми – ІЕС’10») – К.: ІЕД НАНУ, 2010. – С. 17–23.
116. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетич-них систем та їхнє технологічне забезпечення // Техн. електродинаміка. 2010, № 6. – С. 44–50.
117. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Баталов А.Г., Денисюк С.П. Технологічний базис інтелектуальної об’єднаної енергетичної системи України // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН Украї-ни: Зб. наук. пр. Спец. ви-пуск. Ч. 1 – К.: ІЕД НАНУ, 2011.– С. 20–31.

118. Денисюк С.П. Формування технологічного ба-зису модернізації розподільних електричних мереж на основі концепції SmartGrid // Енергетика: економіка, технології, екологія, 2012, № 1. – С. 90- 97.

119. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні. // Техн. Електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 52–67.

120. Денисюк С.П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014.– №1(35). С. 7–21.

121. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы / Под общ. ред. А. В. Кириленко. К.: ІЕД НАНУ України, 2014. – 409 с.

122. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими / За заг. ред. О.В. Кириленко . К.: ІЕД НАН України, 2016. – 400с.

123. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Танкевич С.Є., Базюк Т. М. Інформаційне та нормативне забезпечення організації мультиагентного керування електроенергетичної системи із активним споживачем Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія, 2016, № 1. – С. 29-34.

124. Сотник М.І., Хованський С.О. Організаційні основи енергозабезпечення підприємств. Суми: Вид-во СумДУ, 2009. - 132 с.

125. Енергоощадна технологія електро-теплоакumuляційного обігріву в житлово-комунальному та аграрно-промисловому комплексах України. / Ред. Д.Й. Розинський. Авт.: Д.Й. Розинський, В.Д. Іоргачов, С.Я. Меженний, М.М. Меркулов, В.В. Оксак, М.П. Тимченко, С.М. Тітенко – К.: Видавництво Купріянова О.О. – 2007. – 272 с.

126. Сучасний стан і основні напрямки застосування електричної енергії для теплопостачання в Україні / Ред. А.А. Долінський, Д.Й. Розинський. Авт.: А.А. Долінський, М.П. Тимченко, Д.Й. Розинський. – К.: Видавництво Купріянова О.О. – 2009. – 252 с.

127. Тепловые режимы помещений при экологически чистом теплоаккумуляционном напольном отоплении /Л.Ф. Черных, Н.М. Фиалко, Д.И. Розинский, В.И. Савенко. – Киев: София-А, 2014. – 416 с.
128. The DOE Global Energy Storage Database [электронный ресурс] <http://www.energystorageexchange.org>
129. U.S. Energy storage monitor [электронный ресурс] <http://energystorage.org/energy-storage/us-energy-storage-monitor>
130. Decourt B., Debarre R. Carbon Capture and Storage: Bringing Carbon Capture and Storage to Market. / Series: Leading the energy transition. SBC, Institute Energy, Paris, 2013. – 59 p.
131. Decourt B, Debarre R. Electricity Storage: Factbook. Schlumberger Business Consulting Energy Institute, Paris, 2013. – 98 p.
132. The future role and challenges of Energy Storage. DG ENER Working Paper//European Commission Directorate-General For Energy/ – 36 p. [электронный ресурс] https://ec.europa.eu/energy/-/sites/ener/files/energy_storage.pdf.
133. Technology Roadmap: Energy Storage. International Energy Agency, Paris, 2014. – 64 p.
134. Розкладка Дорожньої карти "Energy Storage" [электронный ресурс] https://www.iea.org/media/freepublications/technologyroadmaps/foldout/FOLDOUT_TechnologyRoadmapEnergystorage_2014.pdf
135. Landry M., Gagnon Y. Energy Storage: Technology Applications and Policy Options / In: Energy Procedia 2015, 79. – p.315 – 320.
136. E-storage: Shifting from cost to value wind and solar applications 2016. World Energy Council, 2016 – 27 p.
137. World Energy Resources Full report. World Energy Council, 2016 – 1028 p.
138. Storing energy: With special reference to renewable energy sources / Letcher T.M. (Ed.). Amsterdam: Elsevier, 2016 – 590 pp.
139. Lele F. A.Thermochemical Heat Storage System for Households, Springer International Publishing AG, 2016 – 225 p.

140. Liebreich M. Bloomberg: New Energy Finance Summit, New York, 5 April 2016 [электронный ресурс] [http://www.bbhub.io/bnef/sites/4/2016/04/BNEF – Summit-Keynote-2016.pdf](http://www.bbhub.io/bnef/sites/4/2016/04/BNEF-Summit-Keynote-2016.pdf)

141. Liebreich M. Bloomberg: New Energy Finance Summit, New York, 25 April 2017/ [электронный ресурс] [https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/04/2017-04-25-Michael-Liebreich-BNEF Summit-Keynote.pdf](https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/04/2017-04-25-Michael-Liebreich-BNEF-Summit-Keynote.pdf).

142. <http://www.buchmann.ca/> - "Batteries in a Portable World. A handbook on rechargeable batteries for non-engineers" – интернет-версия книги г-на Isidor Buchmann, главы канадской компании Cadex Electronics Inc.

143. <http://forum.rax.ru/vb/forumdisplay.php?forumid=45> – Мобильники и аксессуарам для них.

144. <http://www.cadex.com> – Cadex Electronics Inc., Vancouver, BC [British Columbia], Canada – разработчик и производитель зарядных устройств, анализаторов и систем обслуживания аккумуляторов.

145. <http://www.mari-el.ru/marmobile/battery/> – Аккумуляторы для мобильных устройств и портативных компьютеров. Анализаторы аккумуляторов.

146. Шепелев, А. О. Расчет емкости аккумуляторных батарей / А. О. Шепелев, Е. Ю. Артамонова. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 17 (121). – С. 99-101.

147. Бубенчиков, А. А. Выбор аккумуляторных батарей для систем автономного питания / А. А. Бубенчиков, Р. А. Дайчман, Е. Ю. Артамонова // Научный аспект. – 2015. – № 4. – С. 208–215.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Сінчук Ігор Олегович
Бойко Сергій Миколайович

СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

ПІДРУЧНИК

Підписано до друку _____
Формат __х__ / __. Ум. др. арк. __
Тираж __ прим.