

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут"

С. В. Сінченко

АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2019

УДК [621.311+621.355] (075.8)
С38

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. Л. І. Книш,
д-р техн. наук А. О. Давідов

Сінченко, С. В.

С 38 Акумулявання енергії [Електронний ресурс] : навч. посіб. /
С. В. Сінченко. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського
"Харків. авіац. ін-т", 2019. – 111 с.

Розглянуто принципи роботи електрохімічних, механічних, теплових, індуктивних та інших типів накопичувачів енергії. Основну увагу приділено фізичним процесам у накопичувачах енергії, особливостям їх характеристик, перевагам і недолікам за умовами їх експлуатації. Наведено загальні залежності параметрів різних типів накопичувачів, особливості конструкції і області їх використання.

Для студентів, що навчаються за освітніми програмами «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» і суміжними спеціальностями.

Іл. 64. Табл. 10. Бібліогр.: 19 назв

УДК [621.311+621.355] (075.8)

© Сінченко С. В., 2019

© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2019

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИЧИН, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП.....	7
1 ВСТУП ДО ДИСЦИПЛІНИ.....	9
1.1 Основні визначення, показники, класифікація і галузь викорис- тання накопичувачів енергії	9
1.2 Принципи використання відновлюваних джерел енергії, їх особливості й характеристики.....	13
1.3 Енергетичний баланс	13
2 ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ АКУМУЛЯТОРИ	14
2.1 Основні терміни і визначення	14
2.2 Загальна характеристика і вимоги, що ставляться до накопичувачів енергії на основі електрохімічних акумуляторів... ..	17
2.3 Параметри хімічних джерел струму.....	19
2.4 Аналіз застосування електрохімічних акумуляторів за типом....	21
3 ПРИНЦИП ДІЇ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ	24
3.1 Принцип дії.....	24
3.2 Електрохімічні процеси.....	24
4 ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ	28
4.1 Формалізація макрокінетики.....	28
4.2 Математичний опис зарядно-розрядних характеристик.....	29
4.3 Вплив внутрішнього опору	32
4.4 Аналітичний вираз розрядної напруги акумулятора	34
4.5 Модель акумулятора, основана на описі схеми заміщення	35
5 ОСНОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ. ДЕГРАДАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ	35
5.1 Основи експлуатації електрохімічних акумуляторів	35
5.2 Деградаційні процеси при експлуатації НКГ БХ.....	43
6 ВОДНЕВІ НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ	47
6.1 Регенеративні установки з водень-кисневим ЕХН.....	48
6.2 Фізико-хімічні процеси у водневих системах накопичення енергії	49
6.3 Зовнішні характеристики паливних елементів	51
6.4 Електролізні комірки	52
7 ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ВОДНЕВИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ	53
8 ТЕПЛОВЕ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ	58
8.1 Застосування теплових акумуляторів..... у системах електрозабезпечення	58
8.2 Теплоакумулювальні матеріали.....	60
8.3 Порівняння різних ТАМ.....	65
9 ОСНОВИ І ПРИНЦИПИ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРІВ	68
9.1 Принцип передачі тепла.....	69
10 МЕХАНІЧНІ НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ	72

10.1 Статичні механічні накопичувачі. Конструктивні схеми	73
11 ДИНАМІЧНІ НАКОПИЧУВАЧІ. СТРУКТУРНІ СХЕМИ	78
12 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ НАКОПИЧУВАЧІ	82
12.1 Класифікаційні ознаки	83
13 ОСНОВНІ РОЗРАХУНКОВІ СПІВВІДНОШЕННЯ ТА СХЕМИ КОМПОНОВКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ.....	86
14 ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ НАКОПИЧУВАЧІ	93
14.1 Особливості електродинамічних накопичувачів, схеми і застосування	94
15 ЄМНІСНІ НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ.....	96
15.1 Загальні відомості про фізичні процеси в конденсаторі	98
15.2 Діелектричні матеріали, що використовуються в конденсаторі ЄН.....	100
15.3 Конструктивний вигляд конденсаторів ЄН	100
16 ІНДУКТИВНІ НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ.....	103
16.1 Переваги і недоліки, галузь застосування індуктивних накопичувачів.....	104
16.2 Основні типи індуктивних накопичувачів, їх параметри і показники.....	105
ВИСНОВКИ.....	108
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	109

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИЧИН, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

t – час, с;

t_p – час розряду, с;

d – відстань між пластинами електродів, м;

E – електрорушійна сила, В;

I – струм, А;

I_3 – зарядний струм, А;

I_p – розрядний струм, А;

n – кількість циклів;

q – заряд;

Q – ємність, А·ч;

Q_0 – початкова ємність, А·ч;

$Q_{пов}$ – повна ємність, А·ч;

r – внутрішній опір акумулятора, Ом;

R – опір зовнішнього кола, Ом;

T – температура, К;

U – напруга, В;

U_3 – зарядна напруга, В;

$U_{НРЦ}$ – напруга розімкненого кола, В;

U_p – розрядна напруга, В;

АК – акумулятор;

АКБ – акумуляторна батарея;

БХ – хімічна батарея;

ВДЕ – відновлюване джерело енергії;

ГАЕС – гідроакумулявальні електростанції;

ГЕ – гальванічний елемент;

КА – космічний апарат;

НКГ АК – нікель-кадмієвий герметичний акумулятор;

НРК – напруга розімкнутого кола;
ЛА – літальній апарат;
ЛІА – літій-іонний акумулятор;
ПЕ – паливний елемент;
РКТ – ракетно-космічна техніка;
СБ – сонячна батарея;
СЕЗ – система електрозабезпечення;
ХДС – хімічне джерело струму;
ЕК – електролізна комірка;
ЕРС – електрорушійна сила;
ЕУ – енергоустановка;
ЕХ АК – електрохімічний акумулятор.

ВСТУП

Виробництво і споживання різних видів енергії в світі зростає швидкими темпами, визначаючи прогрес у всіх галузях життєдіяльності людини. Одночасно ускладнюються процеси перетворення енергії, розширюється різноманіття енергетичних установок і агрегатів, які забезпечують найбільш раціональні режими енергоживлення різнорідних споживачів. Поряд зі зростанням кількісних показників енергозабезпеченості промисловості, транспорту, сільського господарства, побуту тощо усе більшу роль сьогодні відіграють показники якості використання енергії, що пов'язано з раціональним узгодженням параметрів енергії на різних стадіях її перетворення. Значне місце у вирішенні проблем, що при цьому виникають відводиться накопичувачам енергії, що є важливою проміжною ланкою між системами генерування і системами розподілу і споживання енергії.

Актуальність проблем накопичення енергії підвищується настільки швидко, що відображення їх значущості в сучасній науково-технічній літературі не відповідає дійсності. Наявні публікації мають в основному, або загальний оглядовий характер, або присвячені окремим, хоча і важливим питанням розроблення накопичувачів енергії.

Накопичувачі енергії утворюють великий клас енергетичних пристроїв з широким спектром функціональних можливостей. Кожен з типів накопичувачів енергії має свої специфічні особливості, що визначають основну спрямованість науково-технічних розробок при його реалізації. Тому проблематика завдань при вивченні накопичувачів є досить різнорідною і не дає змоги канонізувати методичні аспекти опису накопичувачів різного типу. Так, наприклад, для паливних елементів та акумуляторних батарей головні проблеми пов'язані із забезпеченням збалансованих фізико-хімічних реакцій, вирішенням технологічних і матеріалознавчих завдань. Індуктивні накопичувачі слід розглядати з урахуванням динаміки електромагнітних процесів, оптимізації геометрії котушок, міцності, реалізації раціональних теплових режимів. При описі ємнісних накопичувачів, що використовуються зазвичай як стандартні конденсатори, акценти зміщуються на проблеми оптимальних режимів

заряду конденсаторів і раціонального узгодження характеристик елементів систем з накопичувачами в динамічних режимах. Особливого значення при вивченні накопичувачів магнітної і електричної енергії набувають питання комутації ланцюгів при великих токах і навантаженнях, яке зазвичай не може забезпечуватися стандартною апаратурою і потребує розроблення спеціальних швидкодіючих замикачів і розмикачів. Аналіз механічних накопичувачів передбачає пріоритетну роль питань динаміки механічних процесів, а при описі електромеханічних і електродинамічних накопичувачів не менш важливе значення має приділятися електричним перехідним процесам і тепловим режимам.

Особливе значення має узгодження характеристик накопичувачів усіх типів з параметрами первинних джерел енергії, навантажувальних елементів, комутаційної апаратури і т.ін.

Цей посібник містить докладний опис широкого класу накопичувачів для стаціонарних і автономних енергетичних установок, побудований на загальній методичній основі.

Крім аналізу основних фізичних процесів у накопичувачах енергії різного типу в посібнику наводяться математичні моделі й розрахункові співвідношення, що дають змогу визначати головні параметри й показники накопичувачів, а також вибирати ефективні режими їх роботи. Велику увагу приділено розгляду нестационарних процесів у накопичувачах енергії, узгодженню й аналізу електродинамічних, механічних, теплових та інших явищ, що визначають робочі характеристики накопичувачів.

Призначення цього посібника полягає в ознайомленні з широким застосуванням накопичувачів енергії в електроенергетичних системах, автономних енергетичних установках, транспортних системах, бортовому обладнанні, технологічній апаратурі, електрофізичних стендах.

1 ВСТУП ДО ДИСЦИПЛІНИ

Акумулявання енергії – одна з найбільш важливих проблем при експлуатації енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії. При широкому використанні відновлюваних джерел енергії стикаються з необхідністю зменшення недоліків, спричинених принципами практичного перетворення відновлюваних джерел енергії сонця, вітру та ін.

Періодичність дії сонця і вітру зумовлює неритмічність енергопостачання, а різна швидкість вітру та інтенсивність сонячного випромінювання – нестабільність енергетичних характеристик. Тому в енергосистемах автономних об'єктів широко застосовують накопичувачі енергії (таблиця 1.1), які не тільки забезпечують стабільне і безперервне енергопостачання споживачів, але і підвищують коефіцієнт використання відновлюваних джерел шляхом накопичення надлишкової і низькопотенціальної енергії, яка не може бути використана споживачами безпосередньо.

1.1 Основні визначення, показники, класифікація і галузь використання накопичувачів енергії

1. У загальному вигляді під накопичувачем енергії будемо розуміти пристрій, що дозволяє накопичувати в ньому енергію будь-якого виду.

Визначення «Акумулятор енергії» (АК) – це пристрій, призначений для споживання енергії на проміжку часу, що зветься часом заряду t_3 , і подальшою видачею цієї енергії на проміжку часу, званому часом розряду t_p .

Взаємозв'язок параметрів накопичувача при заряді і розряді визначається законом збереження енергії, що виражається очевидним співвідношенням для всіх видів систем накопичення:

$$\eta \cdot P \cdot t_3 = P \cdot t_p, \quad (1.1)$$

де η – ККД акумулятора;

P – потужність акумулятора.

2. Функції накопичувача при експлуатації в енергосистемах (ЕС):

– забезпечення безперебійного енергопостачання споживачів шляхом накопичення надлишкової енергії і подальшого її використання в періоди відсутності або недостатньої кількості енергопостачання;

– забезпечення оптимального режиму роботи джерел енергії та споживачів шляхом згладжування коливань в електромережі;

– підвищення потенціалу енергії до необхідної якості при накопиченні низькопотенціальної енергії;

– перетворення енергії одного виду в інший залежно від потреб споживача.

3. Галузь застосування:

- 1) накопичення енергії, коли є надлишок;
- 2) буферний режим роботи – енергія акумулюється при її надлишку і видається при її нестачі;
- 3) режим або тривалий, або імпульсний;
- 4) перетворення енергії різного виду;
- 5) трансформація потужності при $t_p \ll t_z$; $P_p \gg P_z$.

Таблиця 1.1 – Застосування акумуляторів енергій в галузях

Галузі застосування	Акумулятори енергії							
	Гідро-акумулятор	Стиснений газ	Інерційні накопичувачі	Теплові акумулятори	Електроакумулятори	Водневі накопичувачі	Редокс-системи	Надпровідникові накопичувачі
Електроенергетика	+	+	+	+	+	+	+	+
Електромобілі			+		+	+		
Сонячна енергетика			+	+	+	+	+	
Вітроенергетика	+	+	+	+	+	+	+	
Системи гарантованого живлення			+		+	+		

4. Основні показники накопичувачів (таблиця 1.2):

- питома енергія;
- час виведення енергії.

5. Основні характеристики АК (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 – Показники акумуляторів енергій

Акумулятор енергії	Питома енергія		Питома потужність, Вт/кг	η , %	Вартість, \$/кВт
	Теоретична, Вт·ч/кг	Реальна, Вт·ч/кг			
Гідроакумулятор	0,27	0,2	0,5	65...75	2...15
Механічний акумулятор (маховик)	10...570	30...400	$7 \cdot 10^4$	70...85	30...240
Кислотні (свинцеві) акумулятори	170	25...50	100	50	5...30
Стиснений газ (ступінь стиснення 66)	100	65...75	100	65...75	4...20

Продовження таблиці 1.2

Акумулятор енергії	Питома енергія		Питома потужність, Вт/кг	η, %	Вартість, \$/кВт
	Теоретична, Вт·ч/кг	Реальна, Вт·ч/кг			
Високо-температурні акумулятори	600...900	100...220	220	70...80	20...90
Акумулятори з новими електролітами	480	130	130	60...75	100
Накопичувальні системи з ЕХГ	3,7·10	1,8·10 ⁻³	100	45	5...30
Редокс-системи	836	5...15	3	45	5...30
Ємносні накопичувачі	4	2·10 ⁻⁴	10 ⁵ ...10 ⁸	30	2,5
Індуктивні накопичувачі	4	0,1...0,5	10 ⁵	25	3·10 ³
Магнітні накопичувачі	-	-	10 ⁹	25	10 ⁴ ...10 ⁵
Надпровідникові накопичувачі	20	10 ⁻³ ...3	5·10 ⁶	80...95	40...5·10 ⁶

6. Класифікація акумуляторів (рисунки 1.1, 1.2):

- стаціонарні – працюють в умовах нерухомої активної зони акумуляції;
- автономні – функціонують на автономних об'єктах;
- незворотні – дозволяють використовувати накопичену енергію тільки один раз;
- оборотні (вторинні джерела енергії) – АК, які можуть більше одного разу приймати і віддавати енергію (цикл).

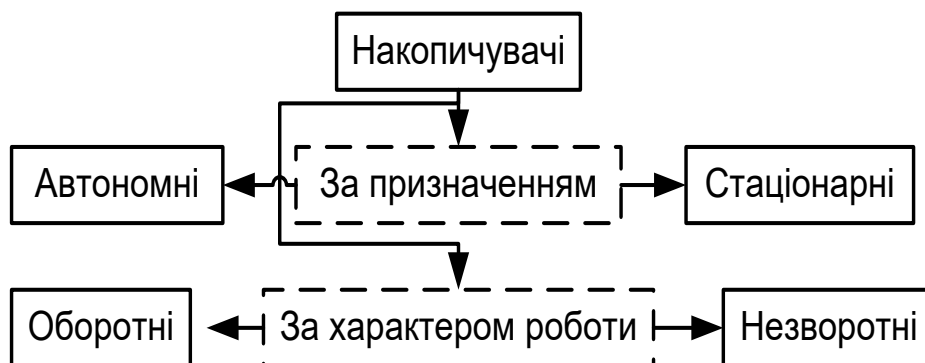


Рисунок 1.1 – Класифікація накопичувачів

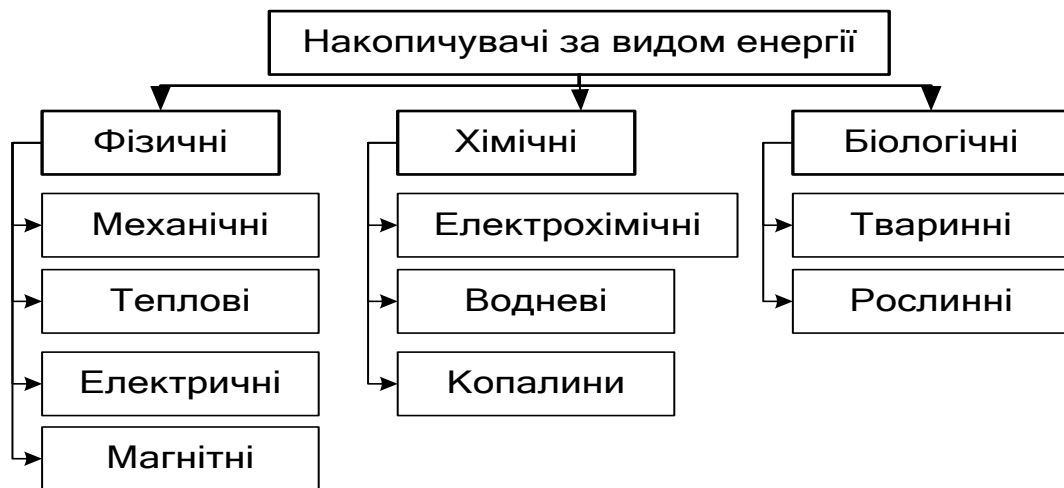


Рисунок 1.2 – Класифікація накопичувачів за видом енергії

За видом енергії накопичувачі бувають:

– фізичні накопичувачі, які запасують енергію шляхом зміни фізичних властивостей акумулювальних матеріалів.

Серед фізичних накопичувачів бувають наступні:

механічні – запасують енергію за допомогою зміни пружності, обсягу, інерції;

теплові – температури;

електричні – електричного потенціалу;

магнітні – магнітного потоку;

– хімічні накопичувачі запасують енергію за рахунок хімічних реакцій зв'язку:

електрохімічні – в процесі окислювально-відновних реакцій відбувається безпосереднє перетворення хімічних зв'язків у електричну енергію, і навпаки. Різновидом електрохімічних накопичувачів за способом перетворення є редокс-системи, де не відбувається витрачання електродного матеріалу в процесі окислювально-відновної реакції, а енергія запасується за рахунок реагентів, які зберігаються зовні.

Водневі акумулятори, в яких елементом перетворення є реверсивний паливний елемент, а зберігання водню здійснюється в газобалонному, криогенному або металгідридному накопичувачі.

Хімічні копалини як накопичувачі – це одноразові системи зберігання хімічнопов'язаних речовин, отриманих шляхом перетворення сонячної енергії рослинним і тваринним світлом, до яких можна віднести газ, нафту, вугілля, торф.

В біологічних накопичувачах безпосередньо використовується потенціал продуктів життєдіяльності тваринного і рослинного світу. Елементом накопичення може бути, наприклад, метан, що генерується в спеціальних установках з подальшим зберіганням у газоподібному або зрідженому стані.

1.2 Принципи використання відновлюваних джерел енергії, їх особливості й характеристики

Можна виділити декілька основних принципів використання відновлюваних джерел:

1. Аналіз наявних потоків енергії.

Аналізуючи відновлювані енергоресурси, важливо встановити, які в навколишньому просторі існуючі потоки відновлюваної енергії доступні для енергетики на відновлюваних джерелах енергії, і орієнтуватися на ці вже існуючі енергоресурси, а не ставити за мету створення нових.

2. Оцінка потужності енергоресурсу.

Цей принцип оснований на тому, що перш, ніж розвивати енергетику на відновлюваних джерелах, необхідно точно визначити їх потужність. Це вимагає регулярних і тривалих спостережень і аналізу параметрів цих джерел.

3. Енергобаланс.

Принцип полягає в тому, що при використанні відновлюваних джерел енергії коливаються як величина добового споживання енергії (максимум - вранці та вдень, мінімум - вночі), так і потужність джерел енергії. Тому необхідно враховувати обидва ці чинники, які часто суперечать один одному, а вирішення цього протиріччя потребує застосування енергоємних акумуляторів енергії.

1.3 Енергетичний баланс

Розглянемо основні етапи побудови та аналізу графіка електроспоживання (ГЕ). На рисунку 1.3 показано графік електроспоживання з відображеними лініями середньої потужності джерела енергії (N_{cp}) і потрібної потужності генератора.

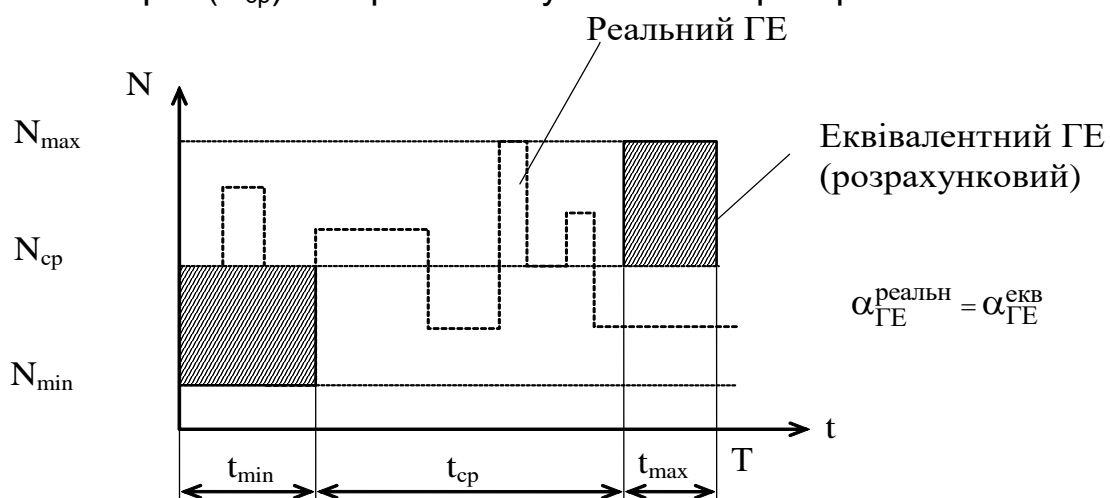


Рисунок 1.3 – Побудова графіка електроспоживання

Ділянки графіка електроспоживання, на яких потужність споживання нижче потрібної потужності генератора, прийнято називати черговим навантаженням, а вище – сеансним, або піковим. В основу аналізу ГЕ покладено енергетичний баланс відносно середньої потужності джерела енергії, при цьому будь-який складний графік енергоспоживання можна привести до простішого – тривісного.

Маючи значення N_{\min} , N_{\max} , $N_{\text{ср}}$, t_{\min} , t_{\max} , $t_{\text{ср}}$, будуємо еквівалентний ГЕ, на підставі якого встановлюємо $N_{\text{ср}}$, вибираємо згідно енергії акумулятор:

$$W_{\text{АК}} = N_{\text{max}} \cdot t_{\text{max}} \quad (1.2)$$

Надалі можемо оптимізувати розподіл енергії між генератором електроенергії, накопичувачем і споживачем.

2 ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ АКУМУЛЯТОРИ

2.1 Основні терміни і визначення

Хімічні джерела струму (ХДС) – це пристрої, в яких хімічна енергія активних речовин при протіканні просторово-розділених окислювально-відновних процесів перетворюється безпосередньо в електричну енергію.

ХДС поділяються на два різновиди за характером роботи:

- гальванічні елементи (первинні джерела струму);
- електрохімічні акумулятори (вторинні джерела струму).

Хімічне джерело струму – загальноприйнята, але неточна назва пристрою для автономного живлення електричною енергією споживачів. У переважній більшості випадків джерело живлення є не окремим елементом, а групою елементів, електрично скомутованих (з'єднаних) між собою. Таку групу називають «батарея елементів» або «хімічна батарея».

Комутація елементів у батареях може бути послідовною або паралельною.

Гальванічний елемент (ГЕ) – елемент, що складається з однієї гальванічної комірки, призначеної для разового безперервного і переривчастого розряду.

Розряд – це перетворення хімічної енергії активних речовин в електричну з використанням її у зовнішньому ланцюзі.

Електрохімічний акумулятор – гальванічний елемент, призначений для багаторазового використання шляхом заряду електричним струмом.

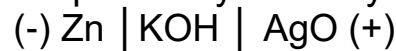
Електрохімічна система – це сукупність активних речовин, на основі яких може бути створений ХДС. Вона має своє умовне позначення:

(-) відновник | електроліт | окислювач (+)

У цьому позначенні між двома вертикальними рисками пишеться хімічна формула електроліту, а зліва і справа – хімічні формули активних речовин до розряду.

Для позначення полярності електрохімічної системи немає єдиного правила. Деякі фахівці справа позначають позитивний полюс, інші – негативний.

Однак, при читанні електрохімічної системи, відповідно до вкоріненої термінології, застосований зворотний порядок знаків (таблиця 2.1). Так, наприклад, срібно-цинкову електрохімічну систему записують так:



Таблиця 2.1 – Короткі характеристики деяких електрохімічних систем

Тип акумулятора	Електрохімічна система	ЕРС, В
Кислотний (свинцевий)	$(-) \text{Pb} \mid \text{H}_2\text{SO}_4 \mid \text{PbO}_2 (+)$	2,1
Нікель-кадмієвий	$(-) \text{Cd} \mid \text{KOH} \mid \text{NiOOH} (+)$	1,36
Нікель-залізний	$(-) \text{Fe} \mid \text{KOH} \mid \text{NiOOH} (+)$	1,40
Срібно-цинковий	$(-) \text{Zn} \mid \text{KOH} \mid \text{AgO} (+)$	1,85
Нікель-металгідридний	$(-) \text{MH} \mid \text{KOH} \mid \text{NiOOH} (+)$	1,36
Нікель-водневий	$(-) \text{H}_2 \mid \text{KOH} \mid \text{NiOOH} (+)$	1,26

Вертикальна риска відповідає межі поділу фаз між електродом і електролітом. У водних розчинах вода не входить у позначення системи. Інші розчинники вказують у позначенні електрохімічної системи.

Акумулятори (вторинні джерела струму) на відміну від гальванічних елементів – є хімічними джерелами електричної енергії багаторазової дії.

При проходженні електричного зарядного струму (*процес заряду*), за прикладом, у срібно-цинкових акумуляторах відбувається реакція окислення активної маси (металевого срібла) позитивного електрода, а на негативному електроді – реакція відновлення. При цьому відбувається накопичення (аккумуляція) заряду [6].

Процес розряду - явище, зворотне заряду, коли сам акумулятор віддає свій заряд по зовнішньому електричному колу споживачеві енергії. При розряді оксиди позитивних електродів поступово відновлюються до чистого металу в кінці процесу, а негативні електроди окислюються. Залежно від умов роботи акумулятор може бути частково або до зумовленої межі розряджений. Для того, щоб після розряду акумулятор включити знову до роботи, його необхідно зарядити.

Розглянемо детальніше складові акумулятора, наведені на рисунку 2.1.

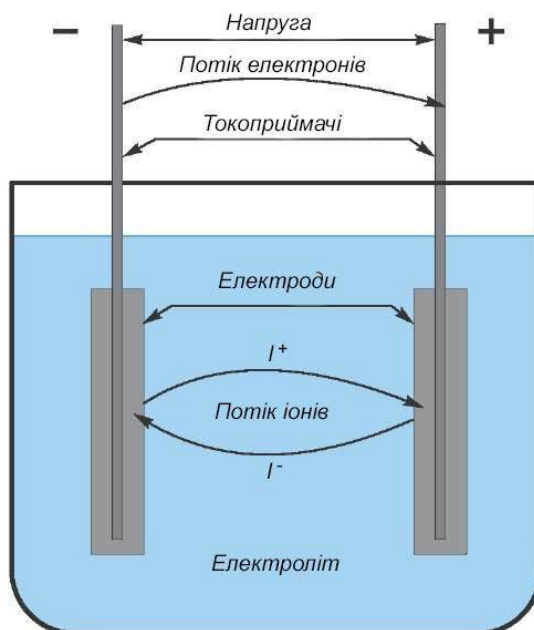


Рисунок 2.1 – Схема акумулятора

Електрод – це провідна фаза електрохімічного з'єднання з одним з виходів АК, що утворює з електролітом фазову межу, по якій протікає електрохімічна реакція.

Анод – це електрод, на якому протікають окислювальні процеси.

Катод – це електрод, на якому протікають відновлювальні процеси (негативний електрод при розряді - анод, позитивний - катод).

Електроліт – це провідник другого роду (іонний-провідник), який служить для масопереносу речовин у процесі окислювально-відновлювальної реакції.

Окислювально-відновлювальна реакція, що протікає між речовинами, що володіють властивостями окислювача і відновника, супроводжуються виділенням електронів, рух яких утворює електричний струм. Однак, щоб використовувати цю енергію, необхідно створити умови для проходження електронів через зовнішній ланцюг, в іншому випадку вона при простому змішуванні окислювача і відновника виділяється в зовнішнє середовище теплом.

Практично всі окислювально-відновні реакції супроводжуються виробленням електроенергії. Але її величина залежить від багатьох факторів, що включають обсяги та маси використовуваних хімічних речовин, застосованих матеріалів для виготовлення електродів, типу електроліту, концентрації іонів, конструкції.

Вимоги до хімічних джерел струму

1. Високе значення питомих показників (питома ємність, питома енергія).
2. Велика ємність і потужність.

3. Полога розрядна характеристика.
4. Малий внутрішній опір.
5. Вимоги до глибини розряду.
6. Широкий інтервал робочих температур.
7. Електричні вимоги (за зарядом і розрядом).
8. Механічна міцність.
9. Можливість роботи.
10. Зручність експлуатації та контрольованості.
11. Герметичність.
12. Мінімальна деградація.
13. Висока надійність.
14. Малі габарити і вага.
15. Нешкідливість для обслуговуючого персоналу.
16. Високі терміни служби.
17. Дешева сировина при виготовленні.
18. Економічні вимоги: низькі первинні і експлуатаційні показники вартості.

Розпишемо докладніше вимоги до хімічних джерел струму.

2.2 Загальна характеристика і вимоги, що ставляться до накопичувачів енергії на основі електрохімічних акумуляторів

Високі значення питомих показників відіграють важливу роль при виборі типу хімічної батареї. До питомих характеристик як окремого акумулятора, так і батареї в цілому, відносять: питому ємність, питому енергію, питому потужність. При вартісних оцінках використовують такі питомі характеристики, як питома вартість і питома вартість енергії. **Питома вартість** – це сума всіх витрат, пов'язаних з розробкою і виготовленням одиниці ХДС, віднесена до його потужності або до частини запасеної енергії, яка віддається. **Питома вартість енергії** – це вартість одиниці енергії, одержуваної від ХДС.

Великі ємність і потужність. Ці характеристики визначають можливості ХДС. Ємність, наприклад, важлива при виборі і комплектації батарей. Вживають різні поняття ємності: теоретична, фактична, розрядна, номінальна, залишкова. Наприклад, номінальна ємність – це ємність, що гарантується виробником, яку джерело енергії повинне віддавати в режимі розряду, зазначеному в технічних умовах. Крім того, вона характеризує цей тип ХДС. Залишкова ж ємність необхідна при визначенні терміну зберігання ХДС, оскільки потужність залежить від режиму розряду.

Положистість розрядних характеристик важлива для підтримки постійного рівня напруги або близького до постійного. На таких пологих ділянках розрядних кривих намагаються експлуатувати ХДС. Більш повну характеристику дає сімейство розрядних кривих, побудованих для різних

значень густини струму і температури, показуючи його енергетичні можливості у певних діапазонах температур і швидкостей розряду.

Малий внутрішній опір. Цей параметр враховують при розробці ХДС (особливо нових типів). Для зниження внутрішнього опору зменшують міжелектродну відстань, використовуючи електродні матеріали і електроліти з високою питомою провідністю, що в кінцевому підсумку ускладнює проблеми конструювання і позначається на вартості ХДС.

Вимоги до глибини розряду. Для багатьох електрохімічних систем термін «служба акумулятора» істотно залежить від глибини розряду (відношення ємності часткового розряду до повної розрядної ємності). При великій глибині розряду ресурс може виявитися невеликим, а при малій або середній глибині розряду може бути досягнуто більше число циклів. Ці закономірності строго враховують при виборі параметрів акумуляторних батарей, які застосовуються на автономних необслуговуваних об'єктах, де потрібно, з одного боку, забезпечити необхідний термін служби в роках, відповідний працездатності апаратури, з іншого боку, бажані високі питомі характеристики, тобто кращу велику глибину розряду, оскільки при малій глибині розряду відповідна частина маси акумуляторної батареї не бере участі у виробленні електроенергії.

Широкий інтервал робочих температур. Ці вимоги накладаються системою терморегулювання. Завдання підтримки необхідного температурного діапазону роботи батареї ускладнює конструкцію як самої акумуляторної батареї, так і системи терморегулювання і збільшує їх масу.

Електричні вимоги (відповідно розряд і заряд) показують складні умови функціонування ХДС. У деяких випадках, наприклад, може знадобитися відбір великої частини ємності БХ за короткий час, великі струми розряду, висока швидкість заряду або спеціальні режими заряду. БХ повинна бути здатна витримувати такі режими.

Механічна міцність. Необхідна, як правило, для рухомих автономних об'єктів. Для акумуляторів може знадобитися механічна міцність акумуляторного корпусу (сосуду), наприклад, для витримування внутрішнього тиску (нікель-водневі акумулятори) або надлишкового тиску, що розвивається при заряді (нікель-кадмієві акумулятори), а також інших складових акумуляторів - електродів, сепараторів, твердих електролітів.

Можливість роботи при будь-якій просторовій орієнтації. Вимога характерна для рухомих автономних об'єктів.

Зручність експлуатації та контрольованості. Як правило, експлуатація ХДС здійснюється без безпосередньої участі людини. Крім того, необхідно забезпечити надійний контроль стану БХ (рівень зарядженості, температурний режим та ін.). Це є додатковим фактором застосовності певного типу ХДС для конкретного призначення.

Герметичність є вимогою безвідходності і успішності функціонування в умовах автономної роботи.

Мінімальна деградація акумуляторів і акумуляторних батарей в процесі експлуатації. Для забезпечення цієї вимоги важливі не тільки технологічні заходи щодо уповільнення і запобігання деградаційних процесів, а й експлуатація в розрахункових режимах.

Всі перераховані вимоги знаходяться у взаємозв'язку один з одним. Тому такі завдання повинні вирішуватися комплексно на всіх етапах розробки і створення ХДС [1-4].

2.3 Параметри хімічних джерел струму

1. Ємність ХДС – це кількість електрики, що віддається хімічним джерелом при його розряді до досягнення кінцевої напруги.

2. Номінальна ємність – це ємність, яку повинен віддати тільки виготовлений ХДС у нормальних умовах роботи.

3. Питома ємність – відношення ємності ХДС до його маси чи об'єму.

4. Розрядна ємність – це кількість електрики, яку можна отримати від ХДС при певних умовах його роботи:

$$I_p = \text{const}; \quad Q_p = I_p \cdot t_p; \quad (2.1)$$

$$i_p \neq \text{const}; \quad Q_p = \int_0^{t_p} i_p \cdot dt; \quad Q_p = \frac{U_p \cdot t_p}{R}. \quad (2.2)$$

5. Зарядна ємність – це кількість електрики, що поглинена ХДС при заряді:

$$I_3 = \text{const}; \quad Q_3 = I_3 \cdot t_3; \quad (2.3)$$

$$i_3 \neq \text{const}; \quad Q_3 = \int_0^{t_3} i_3 \cdot dt. \quad (2.4)$$

6. Гарантована ємність – це ємність, яку повинен віддати ХДС при його роботі у встановленому режимі.

7. Експлуатаційна ємність – це ємність, яку може віддати ХДС в експлуатаційному режимі.

8. Коефіцієнт використання активних речовин:

$$K_{\text{вик}} = \frac{m \cdot Q_p}{M}, \quad (2.5)$$

де m – витрата активних речовин, M – вихід активних речовин.

9. Енергія ХДС – це енергія, що віддається ХДС у зовнішній ланцюг, що дорівнює значенню його ємності на середню напругу розряду.

10. Напрацювання ХДС – це кількість циклів заряду-розряду до зниження ємності нижче гарантійної.

11. Збереження ХДС – це параметр, який визначається тривалістю (доба), при якому ХДС зберігає працездатність.

12. Електрорушійна сила (ЕРС) – це різниця потенціалів між полюсами ХДС при розімкненому зовнішньому ланцюзі. Кількісна міра роботи сторонніх сил із переміщення заряду, характеристика джерела струму:

$$E = I \cdot (R + r), \quad (2.6)$$

де I – сила струму в ланцюзі, R – зовнішній опір, r – внутрішній опір.

Якщо розписати вираз

$$E = I \cdot R + I \cdot r, \quad (2.7)$$

тоді $U_r = I \cdot r$ – внутрішнє падіння напруги, а $U = E - U_r$ – робоча напруга ХДС.

13. Напруга розімкненого ланцюга (НРЦ) – це різниця потенціалів між полюсами ХДС, яка визначається вимірювальним приладом.

14. Коефіцієнт віддачі по ємності (напрузі, енергії) – це відношення кількості електрики ХДС, яке воно віддає споживачеві, розряджуючись до встановленої межі, до кількості електрики, отриманої ним при заряді.

Як сказано вище, в переважній більшості випадків джерело живлення є не окремим елементом, а групою елементів, електрично скомутованих послідовно або паралельно.

15. При послідовному з'єднанні, тобто при з'єднанні позитивного полюса одного елемента з негативним полюсом іншого (сусіднього) і т.д., можна скласти батарею з необхідною напругою, так як при цьому напруги акумуляторів складаються.

16. При паралельному з'єднанні акумуляторів, тобто при з'єднанні позитивних полюсів всіх елементів між собою, можна скласти батарею великої ємності з напругою, яка дорівнює номінальній напрузі одного акумулятора, так як при цьому ємності акумуляторів складаються.

На рисунку 2.2 наведено основні параметри й характеристики АК, які необхідно визначати і контролювати в процесі експлуатації.

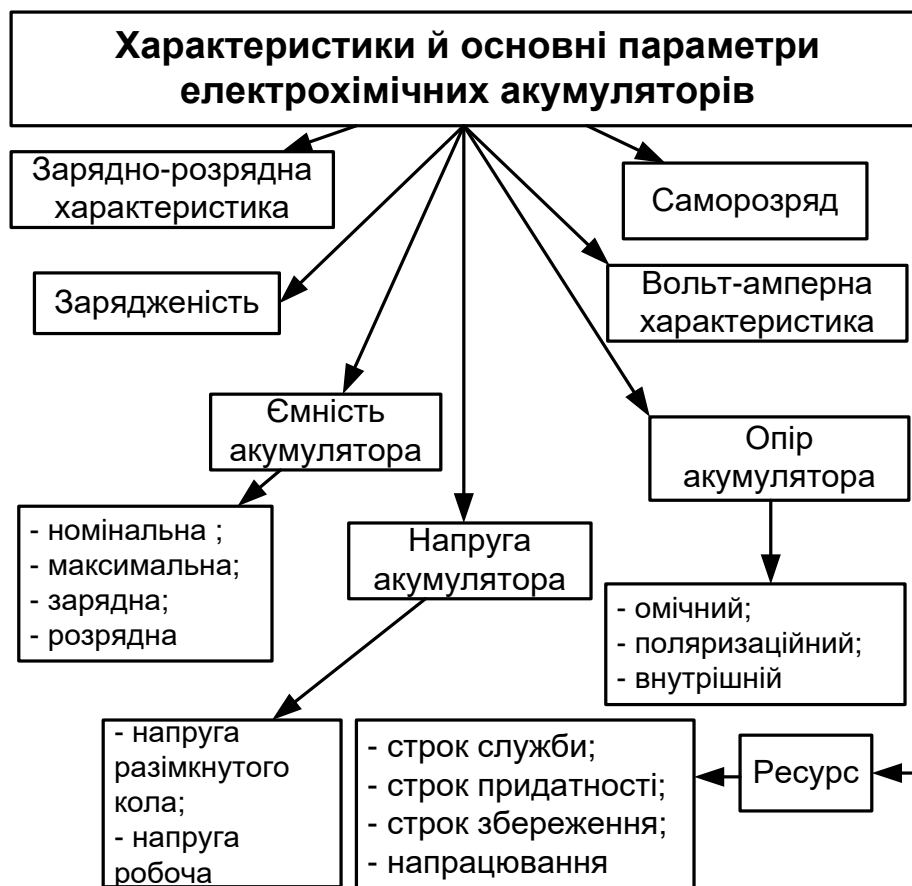


Рисунок 2.2 – Основні параметри й характеристики електрохімічних акумуляторів

2.4 Аналіз застосування електрохімічних акумуляторів за типом

Розглянемо, які за типом електрохімічні акумулятори використовуються на прикладі енергетичних установок космічних апаратів (рисунок 2.2).

На сьогоднішній день найчастіше експлуатуються в енергетичних установках космічних апаратів такі електрохімічні акумулятори: кислотні, нікель-кадмієві, літій-іонні. Тому розглянемо детальніше принципи дії та електрохімічні процеси, що відбуваються у цих акумуляторах.

Приклад використання ХДС у вітроенергетичній установці (комбінування) зображено на схемах рисунків 2.3, 2.4.

Основним завданням комбінованої системи є надійне і стабільне енергопостачання об'єктів (споживачів). Комбінована енергосистема складається з перетворювача енергії (генератора) і акумуляторної батареї, пов'язаної зі споживачами блоком автоматичного контролю заряду і розряду. Система акумулявання на основі ХДС призначена для енергопостачання автономних об'єктів, живих будинків, маяків, буїв, будиночків пастухів, для роботи в загальних енергосистемах. Розрахунок кількості АК відбувається в залежності від параметрів енергоджерела і

споживачів. Роль АК полягає в акумулюванні (низькопотенціальної і пікової) енергії, що виробляється генераторами, яку не можна подати в загальну мережу. Автоматична система керування забезпечує оптимальні режими розряду (заряду) АК і роботу в буферному режимі.

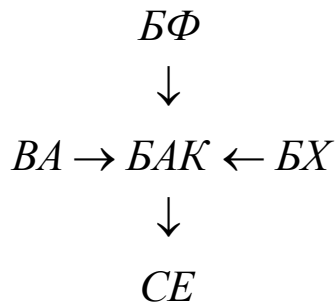


Рисунок 2.3 – Схема вітросонячної системи з ХДС: ВА – вітроагрегат; БФ – фотоелектрична батарея; БАУ – блок автоматичного керування; СЕ – споживачі енергії; БХ - батарея хімічна

На рисунку 2.4 зображено структурну схему системи електропостачання індивідуального будинку, де АДГ – аварійний дизель генератор.

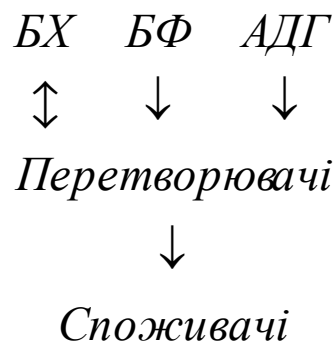


Рисунок 2.4 – Структурна схема системи електропостачання індивідуального будинку

Так як режими приходу електроенергії і її найбільшого споживання не збігаються, передбачено БХ, а на випадок аварії АДГ.

Схема накопичення електроенергії на основі ХДС для автономного житлового будинку складається з таких елементів: акумуляторна батарея; тепловий бак АК; котел АК.

Акумуляторна батарея призначена для вирівнювання добових коливань в електропостачанні житлового будинку, для створення 3-5-добового запасу електроенергії на освітлення та побутові потреби, для підвищення віддачі ВГ на 30...50 %, за рахунок економії (низькопотенціальної і пікової енергії).

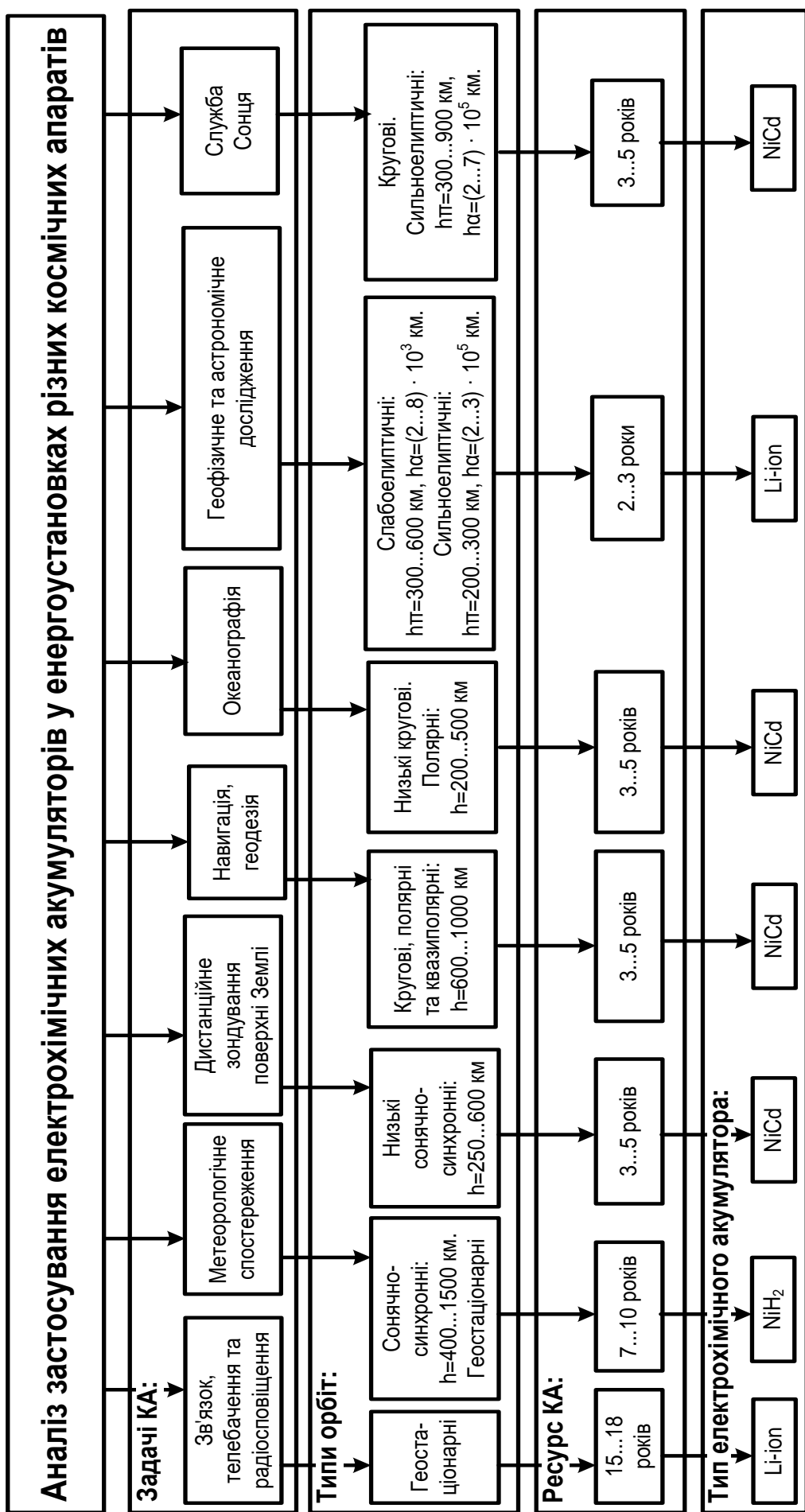


Рисунок 2.5 – Аналіз типів електрохімічних акумуляторів, що застосовуються в енергоустановках різних космічних апаратів [4, 18]

3 ПРИНЦИП ДІЇ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ

3.1 Принцип дії

У кислотному акумуляторі активною речовиною позитивної пластини є двоокис свинцю PbO_2 , а негативною - губчастий свинець Pb . Електролітом служить розчин сірчаної кислоти H_2SO_4 у дистильованій воді. На границі між електролітом і частинками активних мас проходять усі хімічні процеси в акумуляторі, тому для збільшення площі їхнього зіткнення активній масі надають пористу будову.

У кислотних акумуляторах свинець Pb , опущений в розчин сірчаної кислоти, заряджається щодо електроліту негативно, а двоокис свинцю PbO_2 – позитивно. Отже, між двома електродами з'являється різниця потенціалів. Для електроліту зі щільністю $1,15 \text{ г/см}^3$ при температурі 25°C електродний потенціал свинцю $E^- = - 0,27 \text{ В}$, а двоокису свинцю $E^+ = 1,78 \text{ В}$. Це різниця потенціалів $E = 2,05 \text{ В}$.

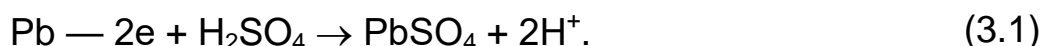
Особливістю *нікель-кадмієвого акумулятора* (НКА) є те, що при розряді і заряді обсяг і щільність електроліту майже не змінюються. Ємність НКА порівняно з ємністю кислотного значно менше залежить від величини розрядного струму, що видно з рисунка 4.2. Основною перевагою НКА є простота догляду за ними в процесі експлуатації і зберігання, а також значно великий термін служби. Розрізняють два види системи: негерметична та герметична.

Особливістю *літій-іонних акумуляторів* є те, що активний літій присутній не у вигляді металу, а у вигляді іонів, які при заряді накопичуються на аноді, а при розряді переходять на катод. Незалежно від різновидів літій-іонних акумуляторів, що відрізняються між собою типами електродів і електролітів, струмоутворювальні реакції у всіх видах аналогічні.

3.2 Електрохімічні процеси

Електрохімічні процеси при розряді кислотного акумулятора

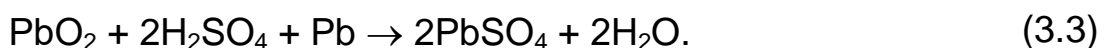
Для негативного електрода загальне рівняння реакції має вигляд



Для позитивного електрода загальне рівняння реакції



Підсумувавши рівняння, отримаємо результативне рівняння розряду:



Таким чином, при розряді кислотного акумулятора активні речовини на негативному і позитивному електродах переходять у сульфат свинцю. Кількість сірчаної кислоти зменшується, а кількість води збільшується, в результаті чого щільність електроліту знижується.

Процес розряду в акумуляторах повинен проходити до повного використання усіх активних речовин. Однак сульфат свинцю, що утворюється, закриває пори пластин і тим самим припиняє доступ електроліту до активних мас, що призводить до припинення хімічних реакцій.

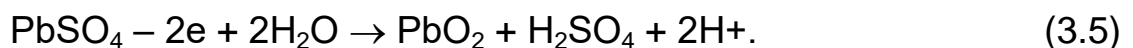
Кислотні акумулятори розряджаються при номінальному струмі розряду до напруги 1,7 В при практичному застосуванні. При цьому активні речовини використовуються на 40 ... 50 %. Розряд акумулятора нижче 1,7 В забороняється, так як це призводить до утворення крупнокристалічного (погано розчинного) сульфату свинцю (що є однією з причин несправностей акумулятора).

Електрохімічні процеси при заряді. Від стороннього джерела в напрямку, протилежному напрямку струму розряду, пропускається через акумулятор ток I_3 заряду.

На негативному електроді загальне рівняння заряду має вигляд



Загальне рівняння заряду на позитивних пластинах

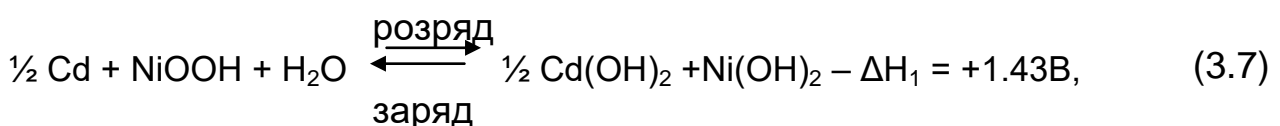


Підсумовуючи рівняння (3.4) і (3.5), отримують загальне рівняння заряду кислотного акумулятора:



Таким чином, при заряді акумулятора сульфат свинцю на обох електродах відновлюється в початкові активні речовини. Кількість води зменшується, а кількість кислоти збільшується, тобто підвищується щільність електроліту.

Рівняння основних процесів нікель-кадмієвого акумулятора
Формальне рівняння струмообразуючої реакції, що характеризує роботу нікель-кадмієвого акумулятора (НКА) у циклі заряд – розряд, записується таким чином:



де ΔH_1 – ентальпія реакції.

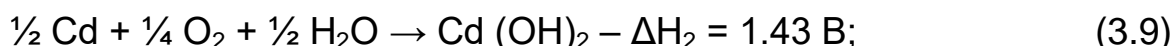
(Для зручності всі термодинамічні величини доцільно відносити до $1 \text{ A} \cdot \text{с}$, що дає можливість позначати їх у вольтах).

Крім основної струмообразуючої реакції в герметичному НКА, мають місце побічні:

реакція виділення кисню на позитивних пластинах при заряді



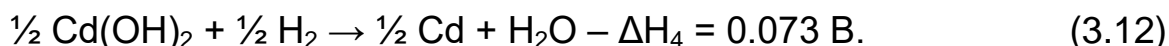
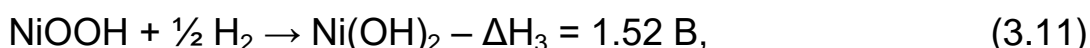
реакція відновлення кисню на негативному електроді при заряді і зберіганні:



реакція виділення водню на негативному електроді при заряді:



реакція окислення водню на позитивному і негативному електродах:

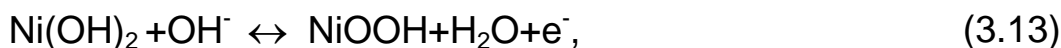


Реакції (3.9) і (3.10) забезпечують стабілізацію тиску при перезаряді і реалізують замкнутий кисневий цикл. Реакції (3.11) - (3.12) протікають в аномальній ситуації виділення водню при заряді.

Розглянемо нікель-металгідридний акумулятор, який схожий з нікель-кадмієвим накопичувачем за електрохімічною системою.

Рівняння основних процесів нікель-металгідридних акумуляторів. У цих Ni-MH акумуляторах використовують гідроокис нікелю для позитивного електроду, подібного Ni-Cd. Водень акумулюється у сплаві, що поглинає водень для негативного електроду, і водному розчині, що складається головним чином з гідрооксиду кальцію для електроліту. Їх реакції заряду і розряду наведено нижче:

реакція на позитивних пластинах



реакція на негативному електроді



сумарна реакція



де M-водень-абсорбуючий сплав; H-абсорбований водень.

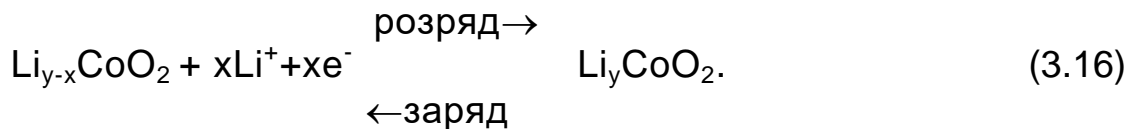
Струмообразуючі реакції літій-іонних акумуляторів. Серед вторинних хімічних джерел струму більшу популярність набирають літій-іонні АК, які почали масово застосовувати для живлення електронних пристроїв. Незалежно від різновидів літій-іонних акумуляторів, що

відрізняються між собою типами електродів і електролітів, струмообразуючі реакції у всіх видах аналогічні. Тому розглянемо роботу акумуляторів з такими типами катодів:

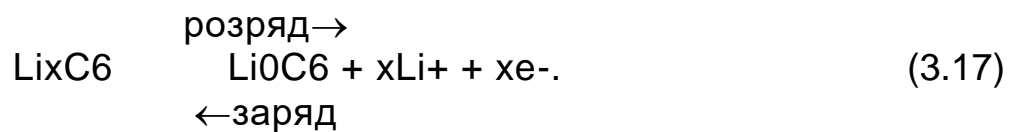


При заряді і розряді акумулятора з кобальтовим катодом відбуваються такі реакції:

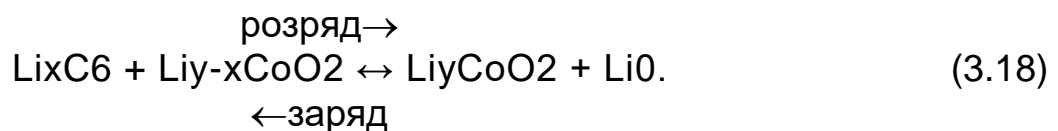
На катоді:



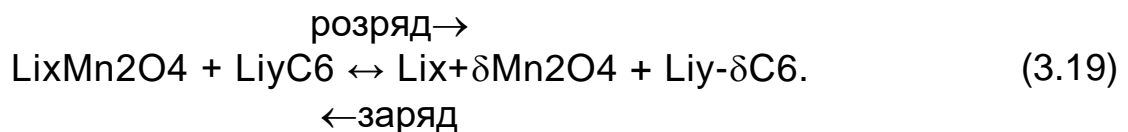
На аноді:



сумарна реакція:



Сумарна струмообразуюча реакція в акумуляторах з марганцевим електродом:



Серед сучасних розробок літійових АК поширюються види таких накопичувачів, у яких матеріалом позитивного електрода використовується LiMO_2 (M Co, Ni, Mn), а негативного – графіт. При зарядженні іони літію від прикладеної зовнішньої енергії виділяються з металу катода, проходять через електроліт і проникають у простір між шарами графіту, накопичуючись там. Коли енергія зарядного пристрою відсутня, а до електродів підключено навантаження, то іони літію в електроліті рухаються у протилежний бік. Якщо заряд і розряд не проводяться, то енергія в акумуляторі не витрачається, а зберігається. Але її кількість обмежується властивостями застосовуваних матеріалів, точніше, воно лімітовано властивостями матеріалу анода.

Наразі вчені працюють над способами підвищення ємності акумулятора, вивчають можливості використання хімічної реакції, що відбувається між літієм і киснем повітря. Для цього розробляються конструкції з повітряним, що не витрачається катодом, який використовується в окремих акумуляторах. Цей метод може до 10 разів збільшити щільність енергії. Експлуатація хімічних джерел струму потребує знання основ електротехніки, електрохімії, матеріалознавства і фізики твердих тел.

4 ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ

Аналітичний опис зарядно-розрядних характеристик акумулятора являє значні труднощі. Це зумовлено тим, що електрохімічні процеси, що проходять в акумуляторі складно формалізуються, а ряд процесів залишається не цілком вивченим.

В процесі роботи хімічного джерела струму активні речовини електродів або електроліту (іноді ті й інші разом) можуть перетворитися в нові хімічні речовини. При цьому змінюються повний внутрішній опір джерела (так як новоутворені речовини мають інший питомий опір) і потенціали електродів, тобто ЕРС. Чим більше електрики віддало джерело струму, тим сильніші зміни у складі його активних речовин і тим значніше його ЕРС відрізняється від початкової. Залежність напруги ХДС від часу розряду t або від розрядної ємності It виражається за допомогою розрядних кривих. Такі криві дають можливість наочно судити про поведінку струму джерела при певних умовах його експлуатації. Однак розрядні криві, що знімаються зазвичай при 4-5 значеннях розрядного струму, не охоплюють усіх можливих випадків експлуатації ХДС. Крім того, зняття розрядних кривих є вельми трудомістською операцією і вимагає витрат часу. Тому ще й досі існують спроби складання рівнянь, які описували б розрядні криві.

Розглянемо три методи аналітичного опису заряду-розряду акумуляторів:

1. Формалізація макрокінетики електрохімічних процесів.
2. Математичний опис експериментально визначених зарядно-розрядних характеристик.
3. Ідентифікація схем заміщення акумулятора.

4.1 Формалізація макрокінетики

Формалізація макрокінетики залежить від ряду параметрів акумулятора, куди входять ємність АК, струм заряду-розряду, температура АК, внутрішній опір (для герметичних АК - тиск газу), при тому напруга заряду (розряду) буде мати вигляд

$$U_{зр} = E_p \pm \eta_1(Q, I_{зр}, T_{АК}) \pm \eta_2(Q, I_{зр}, T_{АК}) \pm I_{зр} \cdot R_0(Q, T_{АК}), \quad (4.1)$$

де E_p – напруга на розімкнутих виводах АК (ЕРС) у стані повної зарядженості;

η_1, η_2 – напруга поляризації анода і катода;

Q – ємність;

$I_{зр}$ – зарядно-розрядний струм;

T_{AK} – температура АК;
 R_0 – внутрішній опір АК;
+ заряд;
- розряд.

4.2 Математичний опис зарядно-розрядних характеристик

Перші спроби аналітичного уявлення розрядних кривих ХДС полягали у встановленні функціонального зв'язку між силою струму і часом розряду, з тим щоб при будь-яких значеннях цих величин можна було обчислити ємність акумулятора [6-9].

Максимальне наближення дає формула Пейкерта [6], що встановлює гіперболічну залежність між зазначеними величинами:

$$I^n t = c, \quad (4.2)$$

де n – постійна величина, яка не залежить від ємності, а тільки характеризує такий тип акумулятора; c – постійна, пов'язана з ваговою кількістю активної маси в акумуляторі. Вона зростає зі збільшенням ваги активної маси. Обидві постійні можуть бути визначені дослідним шляхом при двох різних режимах роботи акумулятора. Рівняння Пейкерта складалось для кислотних АК, але пізніше була доведена спроможність використовувати його для різних типів електрохімічних АК. Багато вчених намагалися дійти до спрощених видів аналітичного запису зарядно-розрядних характеристик з урахуванням усіх необхідних умов експлуатації АК.

Перш ніж перейти до запису аналітичного вираження закономірностей розряду ХДС, покажемо на прикладі ламельного нікель-кадмієвого акумулятора типу КН-10 можливість оцінки за допомогою розрядних кривих залежності ЕРС і повного внутрішнього опору ХДС від різних факторів.

На рисунку 4.1 показано розрядні криві АК КН-10, які експериментально отримані при нормальній температурі через 10 годин після закінчення заряду акумуляторів.

Для спрощення аналізу на рисунку 4.1 нанесено декілька осей абсцис. На верхній осі абсцис відкладено відносну розрядну ємність, тобто величину відношення фактичної розрядної ємності Q до номінальної Q_n , а на інших осях відкладено час розряду. Кожна розрядна крива має свою вісь абсцис.

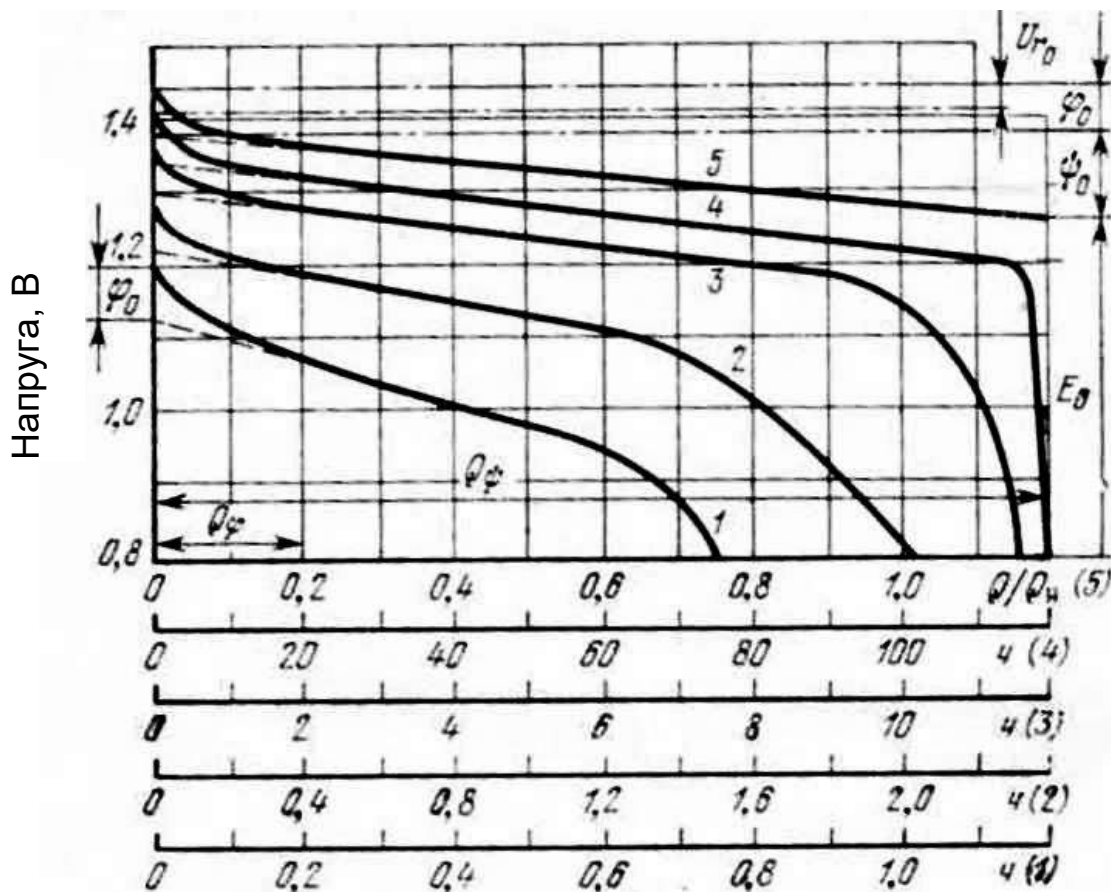


Рисунок 4.1 – Розрядні криві нікель-кадмієвих акумуляторів типу КН-10

На рисунку 4.1 показано розрядні криві, які відповідають значенням струму, наведеним в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Показники струму розрядних кривих акумулятора

Номер кривої	Струм розряду
1	$1Q_H$
2	$0.5Q_H$
3	$0.1Q_H$
4	$0.01Q_H$
5	$E = f(Q/Q_H)$

Крива 5, що позначає залежність ЕРС акумулятора від розрядної ємності $E = f(Q)$, побудована за відомими значеннями ЕРС зарядженого і розрядженого акумулятора. Аналізуючи рисунок 4. 1, можна виявити такі закономірності:

1. Кожна розрядна крива складається з трьох ділянок: двох криволінійних (початкової і кінцевої) і прямолінійної.

2. Якщо криві зняті після закінчення одного і того ж часу після заряду, то у всіх розрядних кривих сполучення початкової криволінійної ділянки

кривої з прямолінійним відбувається при однаковому ступені розрядження акумулятора.

3. Відрізки на осі ординат, укладені між початком кожної розрядної кривої і продовженням її прямолінійно до перетину з віссю ординат, дорівнюють одна одній.

4. Зі зменшенням розрядного струму збільшується крутість кінцевих криволінійних ділянок розрядних кривих.

5. Криву залежності $E = f(Q)$ можна прийняти за розрядну криву при струмі, близькому до нуля.

Тому зазначені вище властивості розрядних кривих властиві і кривій $E = f(Q)$. Оскільки зі зменшенням розрядного струму збільшується крутизна кінцевих ділянок кривих, то кінцеву ділянку залежності $E = f(Q)$ можна вважати вертикальною прямою, що бере початок з точки, відповідної ЕРС розрядженого акумулятора.

Крива $E = f(Q)$ може бути описана аналітичним виразом. Так апроксимація початкових ділянок розрядних кривих експоненціальним законом засвідчила задовільну точність; відхилення розрахункових значень напруги акумулятора від виміряних були вельми незначні.

Опустимо для стислості викладу процес апроксимації, таким чином, ЕРС акумулятора в залежності від розрядної ємності It може бути подана у вигляді суми

$$E = E_0 + \psi + \varphi = E_0 + \frac{\psi_0}{Q_\psi} (Q_\psi - I_t) + \varphi_0 \exp\left(-\frac{3I_t}{Q_\varphi}\right), \quad (4.3)$$

де E_0 – ЕРС розрядженого акумулятора, В; ψ_0 – різниця між ЕРС, що відповідає точці перетину прямолінійної ділянки кривої $E = f(Q)$ з віссю ординат, і ЕРС розрядженого акумулятора, В; φ_0 – різниця рівнів напруг на осі ординат, одне з яких відповідає початку розрядної кривої, а інше – точці перетину прямолінійної ділянки з віссю ординат (рисунок 4.2), В;

Q_φ - розрядна ємність акумулятора при 100-годинному режимі розряду, Q_ψ - розрядна ємність акумулятора, при якій початкові криволінійні ділянки розрядної кривої сполучені з прямолінійними, Ач.

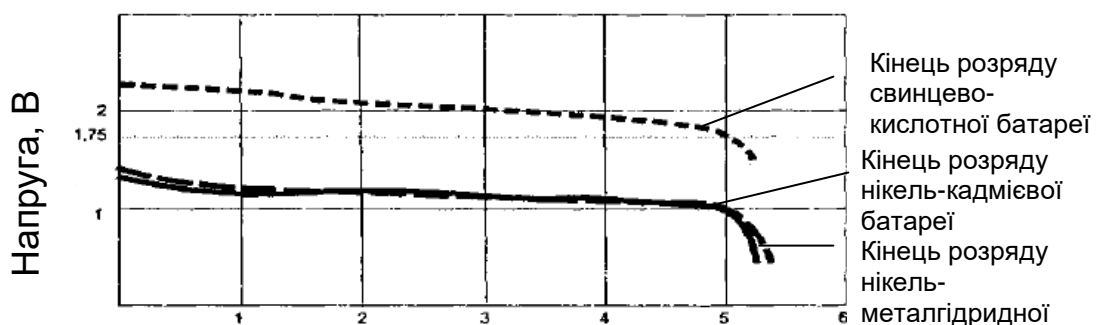


Рисунок 4.2 – Характеристики розряду нікель-кадмієвих, нікель-металгідридних і свинцево-кислотних батарей

4.3 Вплив внутрішнього опору

Оскільки внутрішній опір АК залежить від часу розряду і розрядного струму, то його включення до аналітичного опису зарядно-розрядних характеристик є необхідним. Нарівні з ЕРС на величину напруги ХДС впливає падіння напруги на його повному внутрішньому опорі U_r .

Графічно зміна падіння напруги на повному внутрішньому опорі акумулятора при його розряді може бути виражена у вигляді кривих, одержуваних шляхом почергового вирахування з кривою $E = f(Q)$ кожної розрядної кривої (рисунок 4.3).

Як видно з рисунка 4.3, падіння напруги на повному внутрішньому опорі акумулятора залежить як від величини розрядного струму, так і від розрядної ємності акумулятора.

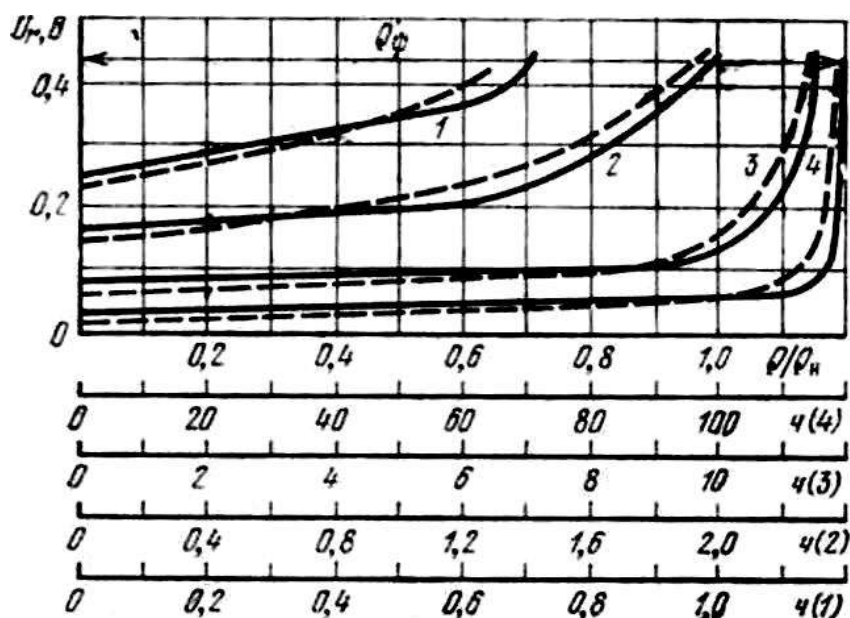


Рисунок 4.3 – Криві залежності падіння напруги U_r на повному внутрішньому опорі акумуляторів КН-10 від відносної розрядної ємності Q/Q_n і від часу розряду при температурі 20 °С

Величина падіння напруги на повному внутрішньому опорі акумуляторів при їх розряді змінюється за законом

$$U_r = U_{r0} \left\{ 1 + \beta \left[1 - \exp \left(- \frac{\alpha I_c}{Q_{\psi} - I_t} \right) \right] \right\}, \quad (4.4)$$

де U_{r0} - падіння напруги на повному внутрішньому опорі зарядженого акумулятора при розрядному струмі, який чисельно дорівнює 0,01 Q_n , В; α і β - безрозмірні постійні коефіцієнти; I_c - коефіцієнт, що показує, яку

частину номінальної ємності акумулятора складає величина розрядного струму, А·ч.

При виведенні формули (4.4) прийнято, що при токах, чисельно менших $0,01Q_n$, $U_{r0} = \text{const}$. Таке припущення виправдане, тому що при струмах, чисельно менших $0,01 Q_n$, падіння напруги на повному внутрішньому опорі акумулятора дуже мале.

Вище вже згадувалося про повний внутрішній опір хімічного джерела струму. Уточнимо тепер це поняття.

Повним внутрішнім опором АК називається опір, який він надає проходженню постійного струму:

$$r = r_{\Omega} + \frac{E_{\Pi}}{I} = r_{\Omega} + r_{\Pi}, \quad (4.5)$$

де r_{Ω} – омичний опір АК, що складається з опору електрода, електроліту і перехідного опору між ними, опору сепаратора, Ом.

E_{Π} – поляризація електрода, В.

r_{Π} – поляризаційний опір, викликаний опором сепаратора, Ом.

Поляризація (перенапруження) - це зсув електродного потенціалу при проходженні струму в порівнянні з його значенням при відсутності струму. Катодний струм спричиняє зрушення потенціалів негативного напрямку, анодний - позитивного. При розряді ХДС потенціал електродів зближується, а при заряді розбігається.

Основні причини поляризації:

1. Змінення концентрації електроліту у поверхні електрода.
2. Складне становище при переході заряду через фазову межу, так звана активаційна.
3. Витрати енергії на кристалізацію.

Омичний опір залежить в основному від ступеня розрядженості АК і температури навколишнього середовища рисунок 4.4.

Опір поляризації залежить від сили струму, ступеня розрядженості ХДС і температури навколишнього середовища.

Для деяких типів ХДС, наприклад для кислотних, нікель-кадмієвих і нікель-залізних акумуляторів, повний внутрішній опір при нормальній температурі може бути поданий у вигляді аналітичного виразу. Дійсно, якщо відомо аналітичний вираз залежності падіння напруги на опорі акумулятора від величини розрядного струму і розрядної ємності (4.4), то залежність опору акумулятора від цих чинників визначиться за формулою

$$r = \frac{U_{r0}}{I} \left\{ 1 + \beta \left[1 - \exp \left(- \frac{\alpha I_c}{Q_v - I_t} \right) \right] \right\}, \quad (4.6)$$

де α, β – константи; Q_v – ємність; I_c – коефіцієнт відносного струму, що вказує, яка частина номінальної ємності акумулятора, припадає на величину струму.

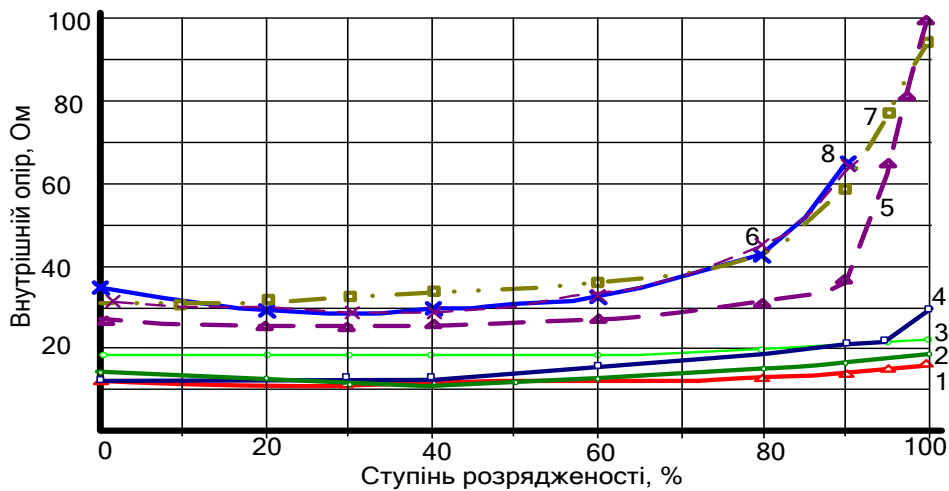


Рисунок 4.4 – Зміна внутрішнього опору для різних НК АК у процесі розряду (омічний 1-4, поляризаційний 5-6): 1,5 – SANYO; 2, 6 – SAFT; 3, 7 – GP; 4, 8 – PANASONIC

Крім розглянутого вище поняття повного внутрішнього опору АК постійному струму, слід розрізняти опір ХДС змінному струму [7].

4.4 Аналітичний вираз розрядної напруги акумулятора

Після визначення понять ЕРС, падіння напруги на повному внутрішньому опорі і опір хімічних джерел струму стає можливим уточнити поняття розрядної напруги АК.

За допомогою формул $U = E - Ur_0$ та (4.4) – (4.6) може бути подана у вигляді аналітичного виразу і напруга акумулятора:

$$U = E_0 + \frac{\psi_0}{Q_\psi} (Q_\psi - I_t) + \psi_0 - \exp\left(-\frac{3I_t}{Q}\right) - Ur_0 \left\{ 1 + \beta \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha I_c}{Q_\psi - I_t}\right) \right] \right\}. \quad (4.7)$$

З рівняння (4.7) видно, що розрядна напруга акумулятора при нормальній температурі залежить від величини розрядного струму і розрядної ємності.

Слід зазначити, що ЕРС, наприклад, розрядженого нікель-кадмієвого акумулятора, прийнятий рівним $E_0 = 1,26$ В, навіть для одного і того ж образця акумулятора не має строго постійного значення, а коливається в залежності від умов розряду і інших чинників у межах 1,20 ... 1,28 В. Однак, якщо навіть для всіх різновидів нікель-кадмієвих акумуляторів прийняти значення ЕРС розрядженого акумулятора незмінним і таким, що дорівнює 1,26 В, то при цьому помітного впливу на точність розрахунків не буде виявлено.

Зарядні характеристики АК можуть бути виведені аналогічно за аналізом залежності напруги АК від відносної ємності.

4.5 Модель акумулятора, основана на описі схеми заміщення

Найбільш перспективним математичним описом акумуляторів є опис за схемою заміщення (рисунок 4.5). Найбільш простою моделлю заміщення АК може бути джерело ЕРС з внутрішнім опором $R_{вн}$ - нелінійний елемент.

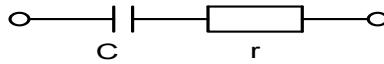


Рисунок 4.5 – Найпростіша схема заміщення АК

Для практичних цілей використовують більш складні схеми заміщення. Повну схему заміщення показано на рисунку 4.6.

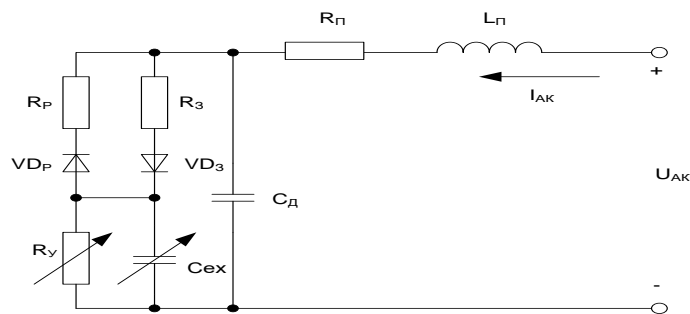


Рисунок 4.6 – Схема заміщення електрохімічного акумулятора [2]

На рисунку 4.6 наведено такі позначення: $R_{П}, L_{П}$ – послідовний опір і індуктивність зовнішніх з'єднань електрода і електроліту; R_p, VD_p – опір і нелінійність, що описують розряд АК; $R_з, VD_з$ – опір і нелінійність, що описують заряд АК; R_y – резистор, який описує нелінійні процеси, пов'язані з саморозрядом; C_{ex} – конденсатор, що описує ємність акумулятора; $C_д$ – ємність подвійного шару.

5 ОСНОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ. ДЕГРАДАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ

5.1 Основи експлуатації електрохімічних акумуляторів

Види розряду

Для ХДС розрізняють види розрядів:

- 1) при постійній силі розрядного струму – $I_p = const$;
- 2) при постійному зовнішньому опорі – $R_H = const$;
- 3) розряд, що перемежується, – $I_p = var$.

Розряд можна вести двома методами:

- переривчастим;
- безперервним.

Розряд, що перемежується, відрізняється тим, що під час його можуть бути здійснені зупинки, а потім змінений спосіб на інші умови, включаючи дві перших і режим заряду.

Види заряду

В основному існує два методи заряду акумулятора:

- 1) заряд постійним струмом;
- 2) заряд постійною напругою.

У деяких випадках використовують метод заряду постійною потужністю.

При заряді важливим є момент індикації кінця заряду. Для різних електрохімічних систем індикація кінця заряду повинна розглядатися як окрема характеристика.

За усталеною термінологією заряд акумулятора може бути дуже швидким (до 15 хв), швидким (до 1 год), прискореним (до 3 ... 4 год), нормальним (від 12 до 16 год) і повільним (рисунк 5.1). Реальна ємність акумулятора залежить від температури і значень струму заряду і розряду. Найбільша виміряна ємність виходить при заряді акумулятора великим струмом і розряді малим.

На прикладі нікель-кадмієвої акумуляторної батареї розглянемо види заряду:

класичний заряд НК батареї - це заряд стабілізованим струмом 10 % від ємності, наведеної на батареї, на протязі 14 годин. Таким чином, для 100 % заряду АК йому необхідно повідомити 140 % від його ємності. Розглянемо на прикладі акумулятора, на якому вказано: 600 mAh (у перекладі означає 600 мАг мільямпергодин) для його заряду необхідно подавати струм, що дорівнює $600/10 = 60$ мільямпер протягом 14 годин. Аналогічно, для заряду батареї ємністю 1200 мАг – 120 мА протягом 14 годин;

прискорений заряд НК батареї – заряд, стабілізованим струмом 30 ... 40 % від ємності, зазначеної на батареї. При цьому зберігається умова надання 140 % ємності. Розглянемо на прикладі БХ ємністю 1000 mAh: нам необхідно надати 140 % від ємності, тобто $1000\text{mAh} \times 140\% = 1400\text{mAh}$. Припустимо, струм заряду вибраний 35 % від ємності, що дорівнює 350 мА, для отримання часу заряду беремо $1400\text{mAh} / 350\text{mA} = 4$ години;

імпульсний заряд НК батареї. Цей вид заряду застосовується для часткового відновлення ємнісних характеристик АК і продовження терміну служби. Суть імпульсного заряду нікель-кадмієвого акумулятора полягає у

чергуванні імпульсів заряду з короткочасним підключенням навантаження (імпульсами розряду);

заряд НК батарей по дельта V. Це найбільш сучасний і точний вид заряду БХ, що запобігає її перезаряду. Велика частина сучасних зарядних пристроїв основані на цьому принципі роботи, в сукупності з контролем стану температури АК в батареї. Отже, що ж таке дельта V? В процесі заряду акумулятора напруга на його виводах зростає і досягає верхнього піку в момент, коли БХ отримала максимально можливий заряд.

Після проходження точки максимального напруження воно починає падати. Цей процес і отримав назву "дельта V". У момент закінчення заряду так само спостерігається стрімке зростання температури АК. Однак потрібно врахувати, що перезаряд струмом вище 10 ... 20% ємності може призвести до вибуху батареї. Таким чином, якщо особливої необхідності в швидкому заряді немає, цілком придатний класичний заряд, тобто стабільний струм 10 % від номінальної ємності.

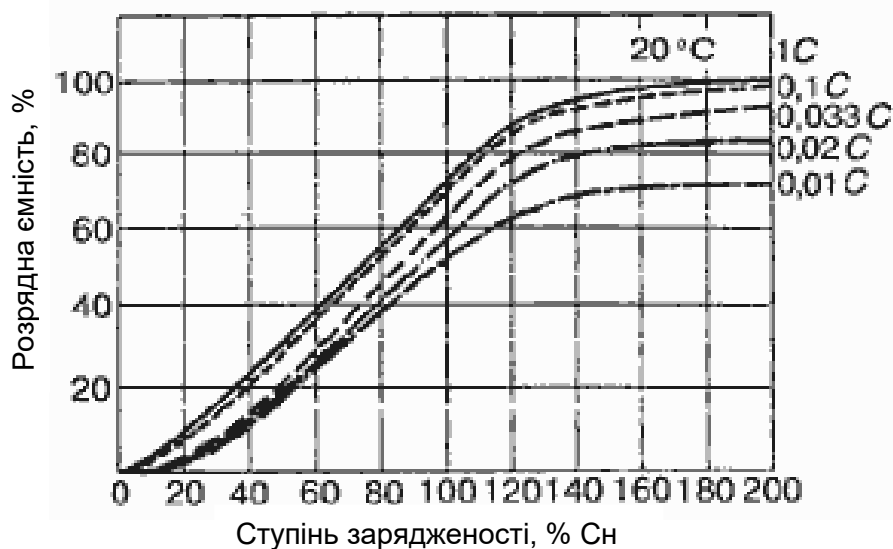


Рисунок 5.1 – Ефективність заряду нікель-кадмієвого акумулятора при різній швидкості заряду

Акумулятори можуть бути заряджені при температурі від 0 до +40°C, найбільш ефективно в інтервалі температур від +10 до +30°C. При низькій температурі поглинання кисню на негативному електроді сильно сповільнюється, і при перезаряді швидке підвищення тиску може призвести до відкриття аварійного клапана. При високій температурі знижується потенціал, при якому на позитивних пластинах починає виділятися кисень, що призводить до більш раннього початку цього процесу.

При одній і тій же температурі підвищення струму для прискорення процесу заряду призводить до збільшення швидкості виділення кисню. Швидкість газопоглинання кисню при цьому практично не змінюється. Вона в більшій мірі залежить від особливостей акумулятора, які визначають

перенесення кисню від позитивного електрода до негативного, а саме: від щільності компонування пакету електродів, товщини і структурних параметрів електродів і сепарації матеріалу, кількості електроліту.

Заряд тим ефективніше, чим тонше електроди акумулятора і щільніше збірка їх пакета. Саме тому циліндричні акумулятори з електродами рулонного типу більше пристосовані до заряду з великою швидкістю. З кривих на рисунку 5.1 видно, що для таких акумуляторів ефективність заряду в інтервалі струмів заряду 0,1-1С практично не змінюється. А зменшення струму заряду призводить до помітного зменшення ємності, яку можна отримати від акумулятора при подальшому розряді.

Пауза між зарядом і розрядом. Після припинення заряду підвищення тиску в акумуляторі деякий час триває, так як на окисно-нікелевому електроді йде процес окислення гідроксильних іонів. У міру зниження потенціалу окисно-нікелевого електрода за рахунок саморозряду швидкість процесу газовиділення знижується і стає сумірною зі швидкістю поглинання кисню на негативному електроді. Переривчастий циклічний розряд наведено на рисунку 5.2.

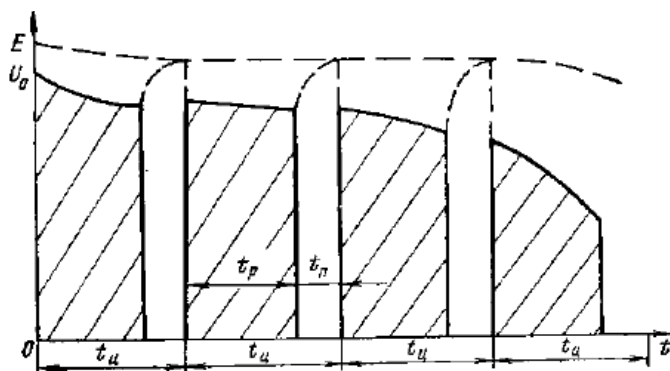


Рисунок 5.2 – Переривчастий циклічний розряд:
 t_p - час включення навантаження; $t_{ц}$ – час паузи

В результаті тиск в акумуляторі починає знижуватися. Зрозуміло, що при однаковому рівні перезаряду чим більше була швидкість заряду, тим більше зростає тиск в акумуляторі після припинення заряду.

Явище саморозряду

Саморозрядом ХДС називаються втрати ємності (рисунок 5.3), зумовлені мимовільним протіканням електрохімічних процесів при розімкненому зовнішньому колі.

$$S = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{Q_1 \cdot \tau} \cdot 100 \%,$$

де τ - доба.

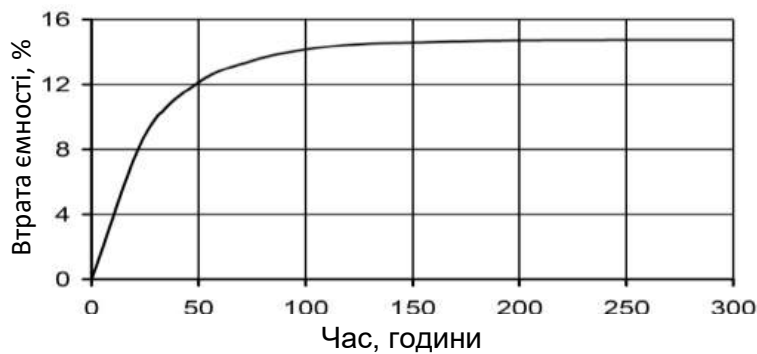


Рисунок 5.3 – Саморозряд герметичного нікель-кадмієвого АК

Напрацювання ХДС

Циклом називається заряд акумулятора з наступним розрядом.

Напрацюванням називається кількість циклів, яке акумулятор пропрацював у певний момент часу.

Терміном зберігання, або збереженням, називається час з моменту виготовлення акумулятора до моменту введення його в експлуатацію.

Працездатність герметичних нікель-кадмієвих акумуляторів при експлуатації визначається головним чином поступовими змінами, які відбуваються в акумуляторах при циклуванні і призводять до неминучого зменшення розрядної ємності і напруги.

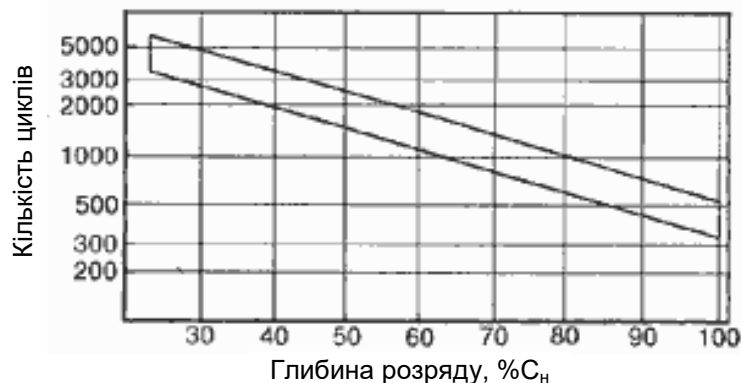


Рисунок 5.4 – Напрацювання герметичних нікель-кадмієвих акумуляторів при різній глибині розряду

На термін служби акумуляторів сильний вплив надає режим експлуатації: режим і глибина розряду, режим заряду, тривалість паузи між зарядом і розрядом при безперервному циклуванні, періоди експлуатації та зберігання. На рисунку 5.4 показано зміну величини напрацювання в циклах циліндричних акумуляторів стандартної серії залежно від глибини розряду.

Основні вимоги до конструкції герметичних нікель-кадмієвих акумуляторів:

- висока надійність електродів акумуляторів;
- висока механічна міцність;
- високі питомі показники.

Електроди, в ХДС компонують в щільний пакет, мають геометричні форми, які відповідають формі корпусу та умовам роботи.

На рисунках 5.5, 5.6 показано варіанти конструкцій акумуляторів, які найчастіше використовують. Для призматичних і дискових АК використовують плоскопаралельні електроди прямокутної або круглої форми, для циліндричних — аксіальне розташування двох циліндричних електродів (б) або спіральне — прямокутних електродів (в). Варіант (б) використовують в умовах, коли електроди (один або два) пористі і можуть мати підвищену товщину, варіант (в) більш прийнятний для АК з малим внутрішнім опором і підвищеними струмами розряду.

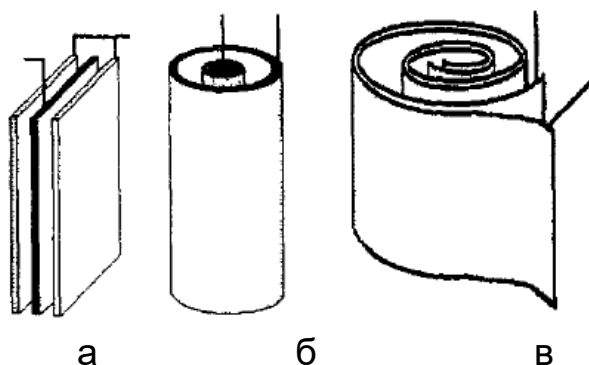


Рисунок 5.5 – Компоновка електродів у АК:
 а – прямокутні плоскопаралельні електроди;
 б – аксіальні (циліндричні); в – спіральні (прямокутні)

Електроди в герметичних НК АК можна збирати за двома технологіями:

- металокерамічна конструкція;
- ламільна.

У зв'язку з тим, що металокераміка дає більш високі питомі показники, для акумуляторів вона найкраща.

Сепаратор – перегородка, яка відокремлює катодний і анодний простори (електролітні камери) джерела струму. Сепаратор у різних ХДС і умовах виконує різні функції, і тому вимоги до його властивостей визначаються саме цими функціями.

Основні вимоги:

- висока пористість;
- висока стійкість;
- висока іонно-пропускну здатність.

Сепаратор попереджує короткі замикання при щільній комутації позитивних і негативних електродів у стиснутий пакет і роботі ХДС в умовах вібрацій і механічних прискорень.

Сепаратор відокремлює активні електроліти в катодних і анодних камерах і попереджує пряму взаємодію між компонентами (активними речовинами, електролітами, конструктивними елементами) у суміжних камерах. Тому ця функція суперечлива, бо сепаратор повинен задовольняти двом несумісним вимогам: попереджувати проникнення окремих (активних) іонів з одного електроліту до протилежного і мінімально гальмувати перенесення струму (тобто іонні потоки).

Сепаратор також виконує функцію електролітоносія в ХДС.

У водних електролітах як сепаратор використовують асбест (паливні елементи з фосфорно-кислим електролітом, до 220°C; елементи з лужним електролітом), пористий полівінілхлорид і поліпропілен (свинцеві акумулятори в середовищі сірчаної кислоти), тонкі капронові тканини (герметичні лужні нікель-кадмієві акумулятори), інші пористі полімерні матеріали.

Виводи електродів акумулятора називаються борни. Основна вимога до них – це надійний електричний контакт між електродами і акумулятором.

Корпус (посудина) акумулятора повинен відповідати вимогам високої міцності. Використовуються три види корпусів: дискові, циліндричні, призматичні (рисунок 5.7).

Зміцнення стінок проводиться тільки діагностикою. Матеріал: сталь. Захист від перезаряду акумулятора забезпечується індикаторами кінця заряду, які можуть бути двох типів: киснево-чутливі, манометричні.

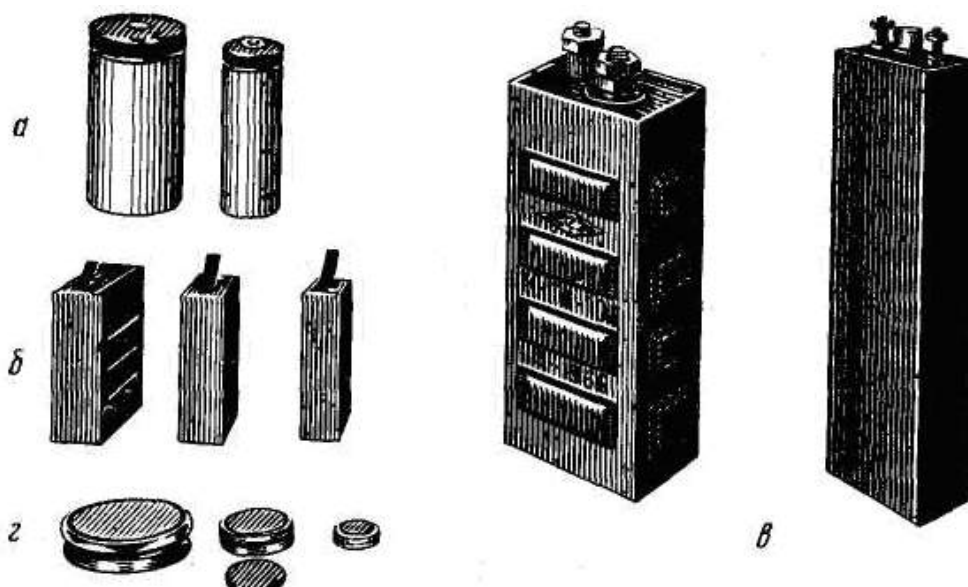


Рисунок 5.6 – Деякі типи герметичних лужних акумуляторів:
а – КНГЦ-3Д та КНГЦ-1Д; б – НКГ-1Д, НКГ-0,7Д й НКГ-0.35Д;
в – КНГК-10Д та КНГ-10Д; г – дискові Д-55С, Д-0.26, Д-0.25, Д-0.125

Основні експлуатаційні характеристики

Зарядні характеристики залежать від їх конструктивного виконання.

Для дискових корпусів характерні зарядні режими, що близькі до негерметичних, для призматичних – згладжений характер, для циліндричних - проміжний.

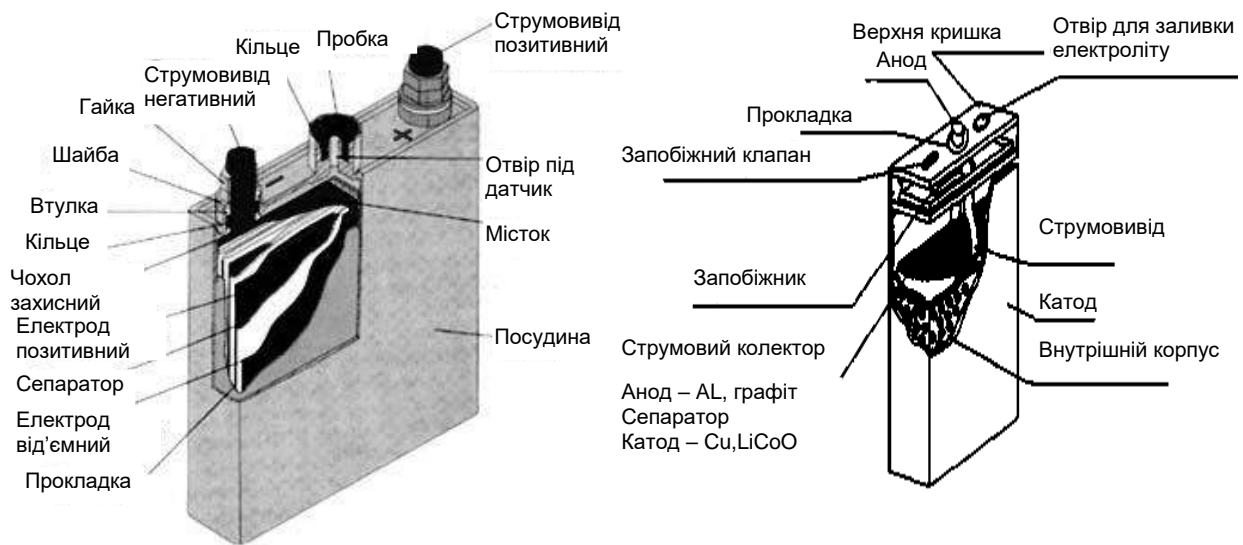


Рисунок 5.7 – Конструкція в розрізі призматичного: а – НК АК; б – Li-ion акумулятора

Розрядні характеристики визначаються величиною розрядного струму і значенням температури електрохімічної системи.

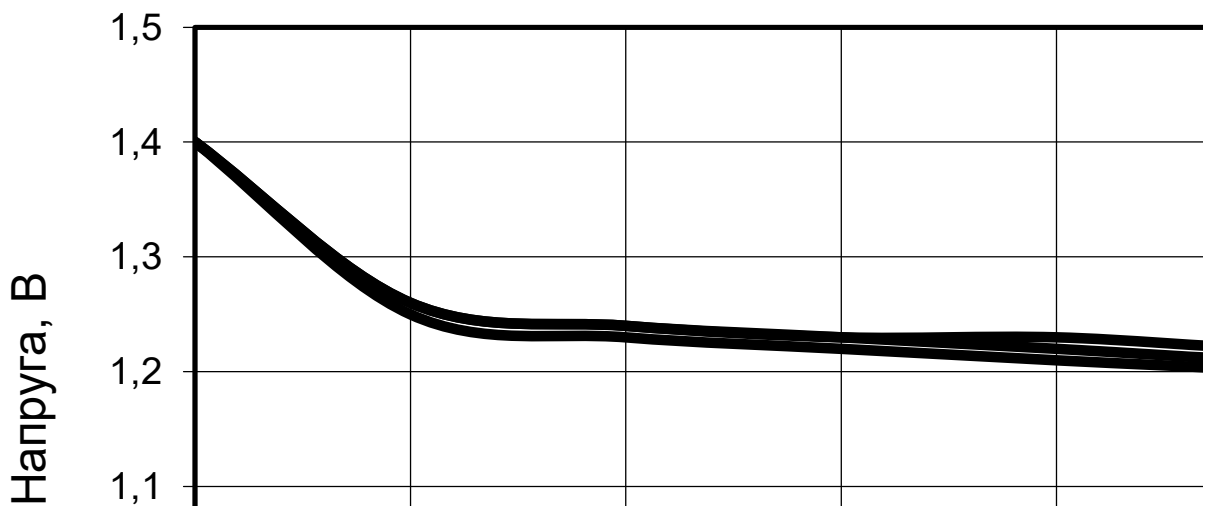


Рисунок 5.8 – Залежність напруги від ємності для різних типів NiCd і Ni-MH АК

За розрядними характеристиками відрізняють акумулятори (рисунки 5.8, 5.9):

- тривалого розрядного струму;
- середнього розрядного струму;

- короткого розрядного струму.

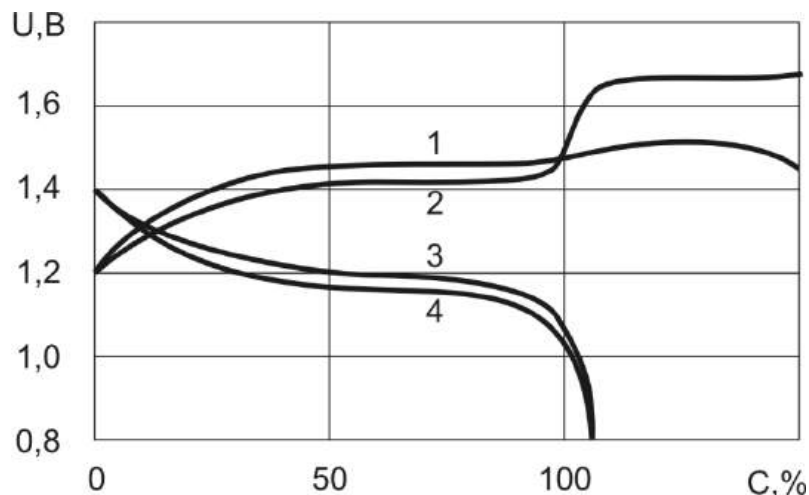


Рисунок 5.9 – Зарядно-розрядні криві акумуляторів:
2, 3 – негерметичних; 1, 4 – герметичних

5.2 Деградаційні процеси при експлуатації НКГ БХ

Великий ресурс роботи НКГ акумулятора є одним з основних переваг буферних накопичувачів такого типу. Однак він істотно залежить від умов експлуатації, а також від особливостей конструкторського виконання і технології виробництва.

Деградаційні процеси у батареях [2]:

- зниження розрядної і збільшення зарядної напруги;
- зменшення розрядної ємності БХ;
- збільшення швидкості саморозряду і зниження ККД циклу;
- обрив ланцюга.

На характеристики БХ істотно впливає температура експлуатації. Найбільший ресурс забезпечується при експлуатації в діапазоні температур 5 ... 15 ° С. Експлуатація при більш низькій температурі часто призводить до генерації водню при великих розрядних струмах. Експлуатація при підвищених температурах викликає збільшення швидкості деградаційних реакцій. При експлуатації НКГ акумулятора протікають різні деградаційні процеси, які і зумовлюють фактичний термін служби акумуляторів і батарей на їх основі. У роботах [4, 25] на основі аналізу орбітальної роботи 36 батарей на геостаціонарних КА (спільне напрацювання - понад 70 років) зроблено висновок, що хоча й існує певна мала ймовірність відмов катастрофічного характеру (тобто раптове припинення функціонування БХ), але найчастіше відбувається поступове зниження вихідної напруги БХ з плином часу, особливо в кінці розряду. Таким чином, у переважній більшості випадків відмова БХ настає

внаслідок поступового накопичення факторів негативного впливу деградаційних процесів.

Герметичне виконання дозволяє протягом всього терміну служби зберігати в акумуляторі оптимальний склад і концентрацію електроліту і не допустити потрапляння в акумулятор і накопичення в ньому за час його експлуатації шкідливих домішок, що можуть істотно вплинути на його характеристики. Висока електрохімічна оборотність цієї системи забезпечує достатню стабільність характеристик акумулятора під час його служби за умови дотримання відповідних правил експлуатації. В цьому випадку деградація характеристик акумулятора протягом його терміну служби буде визначатися в основному повільно протікаючими процесами, пов'язаними з незворотними або частково оборотними хімічними реакціями або структурними змінами в активних масах електродів. Ці процеси ведуть до втрати ємності, трансформації зарядно-розрядних кривих, збільшення струму саморозряду і навіть до повної відмови акумулятора. Причиною незворотних деградаційних процесів можуть також бути і несприятливі умови експлуатації, як-то: тривала робота в умовах перезарядження або одиничний сильний перезаряд акумулятора, або досить глибокий перерозряд акумулятора в режимі переполюсовки.

Основні деградаційні процеси в НКГ акумуляторах і батарей на їх основі. Основними деградаційними процесами незворотного характеру в НКГ акумуляторах прийнято вважати такі:

1. Зміна робочої поверхні електродів [2], пов'язана зі зміною кристалічної структури електродів у процесі багаторазової кристалізації. При цьому є тенденція до поступового укрупнення кристалів, що призводить до зменшення робочої поверхні і зниження тим самим коефіцієнта використання матеріалу і ємності акумулятора. Процес інтенсифікується при малих токах (нижче $0.1C_{ном}$) і підвищеній температурі.

2. Необоротне споживання кисню [31], викликане інтенсивним окисленням органічних компонентів активних мас і сепаратора і повільною корозією металокерамічної основи. Наслідком цих процесів є додатковий саморозряд ОНЕ, що не скомпенсований таким же саморозрядом негативного електрода. Це сприяє поступовому накопиченню на негативному електроді надлишкового Cd , що не бере участі в електрохімічній реакції. Внаслідок такого розбалансу електродів відбувається деформація зарядної кривої з різким збільшенням зарядної напруги до кінця заряду і виділенням з цього моменту водню. При експлуатації акумулятора з обмеженням по датчику тиску (ДД) такий процес призводить до поступового зниження фактичної ємності акумулятора. Процес незворотного окислення інших компонентів акумулятора сприяє збільшенню його внутрішнього опору.

3. Виникнення витоків по містках з провідників першого роду, що утворюється між електродами за рахунок забруднення сепараційного

матеріалу сполуками кадмію. При контакті забрудненої сепарації з ОНЕ відбувається відновлення кадмію і мікрозамикання між електродами. Часткове окислення кадмію в місцях контакту різко збільшує опір таких міжелектродних містків, у зв'язку з чим струм витоку може коливатися в широких межах, аж до повного закорочення акумуляторів.

4. Розбухання нікелевого електрода [80, 81] внаслідок зміни його складу, газовиділення і ін., що призводить до підвищення величини питомого опору. Швидкість розбухання практично постійна в часі і різко зростає зі збільшенням глибини циклування.

Крім необоротних в акумуляторі також мають місце частково або повністю оборотні деградаційні процеси, пов'язані з режимами експлуатації акумуляторів. Основними з них прийнято вважати такі:

1. Утворення інтерметалідів кадмію (Ni_5Cd_{21}), яке особливо інтенсивно відбувається при циклуванні акумуляторів з малою глибиною на верхніх рівнях зарядженості і при підвищених температурах, що приводить до трансформації розрядної кривої з утворенням на ній додаткової площини. При цьому відбувається помітне падіння напруги розряду. Проведення глибокого розряду акумулятора спричиняє руйнування інтерметалідів і відновлення характеристик акумулятора.

2. Накопичення надлишкового тиску, що знижує ефективну ємність заряду акумуляторів, які працюють з обмеженням по ДД. Надлишковий кисень добре поглинається при розряді або зберіганні акумулятора. Надмірний водень поглинається значно повільніше кисню.

3. Накопичення розбалансу поточних значень зарядженості акумуляторів, що є одним з найбільш значущих деградаційних процесів, які суттєво впливають на величину фактичної ємності БХ.

При тривалому циклуванні хімічної батареї через розкиду характеристик складових її акумуляторів (струму витоку, повної розрядної ємності, температури, складу електроліту, пасивації електродів, накопичення внутрішнього тиску і ін.) відбувається розбаланс (розбіг) поточних значень їх ємностей. Це спричинено насамперед технологічною неідентичністю акумуляторів у батареї [1-4, 31]. Накопичення розбалансу акумуляторів призводить до істотного ухудшення ємнісних характеристик хімічної батареї, в основі якої лежить такий механізм: заряд батареї обмежений найбільш зарядженим акумулятором, а розряд - найбільш розрядженим. Таким чином, різниця в поточних ємностях між найбільш зарядженим і найбільш розрядженим акумуляторами в БХ і буде визначати дефіцит ємності батареї.

Відомо, що хімічній батареї з НКГ акумуляторів присуща їй внутрішня здатність до деякої компенсації розбалансу. Механізм цього процесу зумовлений залежністю коефіцієнта ефективності по струму від зарядженості акумулятора [6, 28]. При високих рівнях зарядженості акумуляторів ефективність процесу заряду різко падає, так як в цей момент посилюється інтенсивність протікання побічної реакції утворення

кисню. І тоді процес заряду найбільш заряджених акумуляторів протікає з набагато меншою ефективністю, так як у міру продовження заряду все більша частина енергії, що підводиться, трансформується в енергію внутрішнього газового тиску і в розсіювану теплову енергію.

Велика кількість публікацій, присвячена створенню технічних пристроїв для автоматичного вирівнювання зарядженості акумуляторів і запобігання експлуатації БХ на небажаних режимах.

Пристрої поелементного дорозряду

Для повного розряду всіх акумуляторів у батареї і вирівнювання таким способом розбаланса БХ, а також часткового відновлення ємнісних характеристик акумуляторів було запропоновано безліч способів і пристроїв поелементного розряду (ППР) БХ (рисунок 5.10).

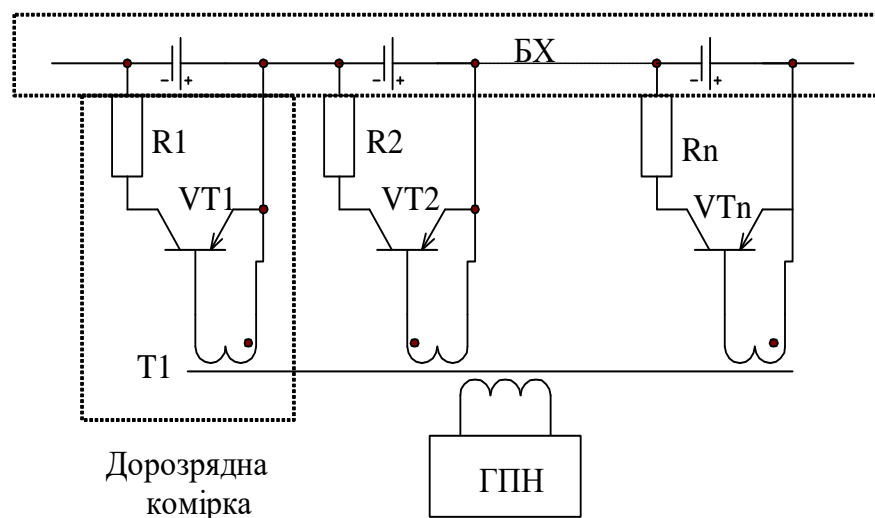


Рисунок 5.10 – Пристрої поелементного дорозряду

Пристрої для захисту від перезаряду, перерозряду і нівелювання зарядженості акумуляторів зображено на рисунках 5.11, 5.12.

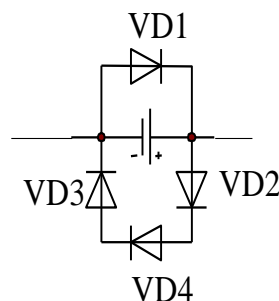


Рисунок 5.11 – Пристрій для захисту акумулятора

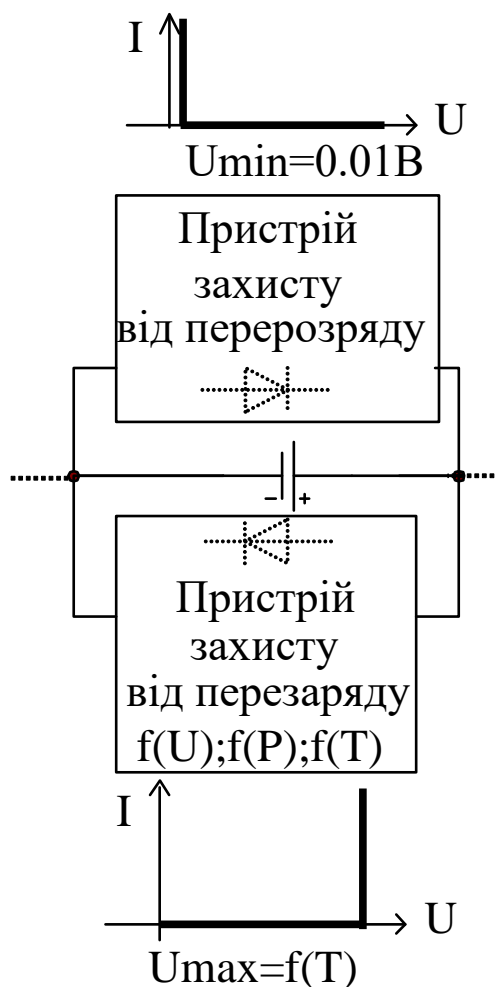


Рисунок 5.12 – Схема обхідного контуру з ідеальними характеристиками

Найбільш простим рішенням пристроїв для захисту від перезаряду і перерозряду є використання байпасних (обхідних) ланцюгів, включених паралельно кожному акумулятору. Такі ланцюги з кінця 70-х років застосовуються на багатьох КА.

6 ВОДНЕВІ НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ

Один з видів електрохімічних накопичувачів, у якому організований регенеративний цикл водню, називається *водневим накопичувачем енергії*.

Основою водневого накопичувача енергії на борту космічного літального апарата є паливні елементи і електролізні комірки.

Паливний елемент (ПЕ) – це ХДС, в якому активні речовини надходять до електродів іззовні, прямий перетворювач хімічної енергії в електричну, в якому реакція окислення протікає без витрати речовин електроду і електроліту.

Характерними показниками якості ЕХН на основі паливних елементів є питома енергія на одиницю маси.

Для водневого циклу питома енергія - $W_{num} \approx 10^4 \text{ Дж/кг}$.

У процесі виробництва, перероблення, зберігання і використання водню як накопичувача енергії відправною точкою є те, що продукти реакції і самі реагенти є нетоксичними, а отримуються в процесі електрохімічної реакції. Вода і кисень так само можуть бути використані для потреб довготривалих космічних станцій.

У перспективі ВЕН має розглядатися як крупно масштабне застосування електрохімічних генераторів у тих енергетичних системах, в яких навантаження нерівномірно розподілене протягом доби.

Для акумулювання енергії водневого циклу можливе використання установок, які містять зворотний блок «електролізер - електрохімічний генератор».

Електрохімічним генератором називається блок паливних елементів з відповідною комутацією для досягнення відповідних параметрів за напругою.

Електролізер (електролізна комірка) - це пристрій, призначений для розкладання води на водень і кисень при пропущенні через воду постійного електричного струму.

Для сучасних ЕУ на основі накопичення водню ККД електролізера досягає 0.85, а $\eta_{EXT} \leq 0.65$.

Загальний цикл $\eta_{H_2} \leq 0.55$.

При рівномірно збереженій енергії для установки з ЕХГ у порівнянні з гідроакумулятором необхідний об'єм води менший близько в 2000 разів.

6.1 Регенеративні установки з водень-кисневим ЕХН

Найбільш перспективним типом ЕХН можна вважати установку, в якій ЕХГ працює разом з регенератором. У такій системі виробництво водню здійснюється електролізом (рисунок 6.1).

Найбільш вигідними системами електрохімічних накопичувачів водню є системи з високим тиском реагенту при їх зберіганні. Для експлуатованих систем тиск становить від 180 до 270 кг/см^3 .

Спосіб електролізу відрізняється високим ККД, який визначається як відношення теплоти згорання отриманого палива до енерговитрат на виділення кисню і водню.

Зараз ККД установок становить 70 – 80 % і більше.

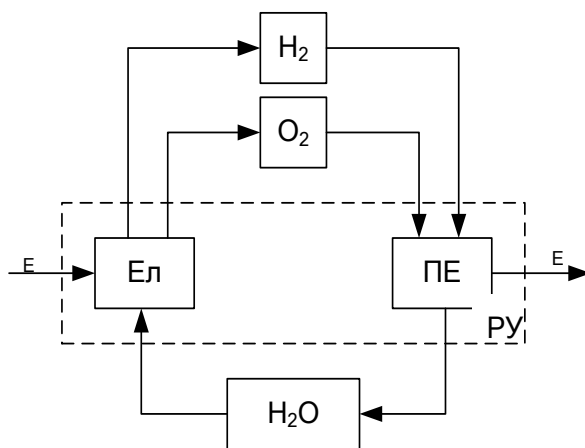


Рисунок 6.1 – Регенеративна установка з водень-кисневим електрохімічним акумулятором:
 РУ – регенеративна установка; Ел – електролізер;
 Е – енергія; ПЕ – паливний елемент.

6.2 Фізико-хімічні процеси у водневих системах накопичення енергії

Процеси в паливних елементах

Принципова відмінність процесів електрохімічного окислення від реакції горіння полягає в тому, що в реакції горіння процес окислення протікає одночасно у всіх елементарних об'ємах, а при електрохімічному окисленні реакції локалізовані в різних областях внутрішнього об'єму.

Для проведення реакції електрохімічного окислення застосовуються паливні елементи. У паливному елементі реакції окислення відбуваються на стику трьох фаз: газоподібної, рідкої і твердої. Найпростіший паливний елемент – це паливний елемент з рідким електролітом, який зображено на рисунку 6.2.

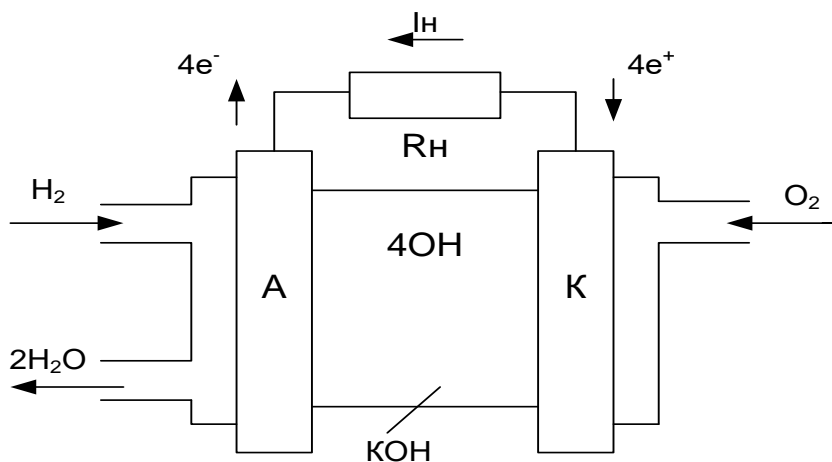
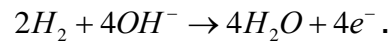
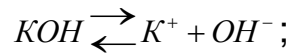


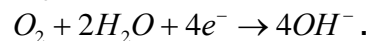
Рисунок 6.2 – Паливний елемент з рідким електролітом

Електроди паливного елемента виконані з композиційного матеріалу із застосуванням платинових каталізаторів. Електроди між собою розділені електролітом KOH. Усе поміщено в спеціальний корпус, який не взаємодіє з продуктами реакції (титановий сплав).

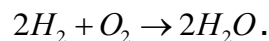
На поверхні аноду відбувається змочування водню:



На поверхні катоду відбуваються аналогічні реакції тільки з киснем:



Сумарна реакція горіння водню:



Як електроліт можна застосовувати кислоти (H_2SO_4 та ін.).

Особливості:

- неможливо працювати при низьких температурах, 373 ... 523 ° K – середні температури, більш 523 ° K – високі температури;
- підвищення ККД і віддача за реакцією збільшується з підвищенням тиску реагентів $P_{раб} = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Прагнення збільшити віддачу ПЕ призвело до того, що було опрацьовано ПЕ з іонно-утворювальною мембраною (рисунок 6.3).

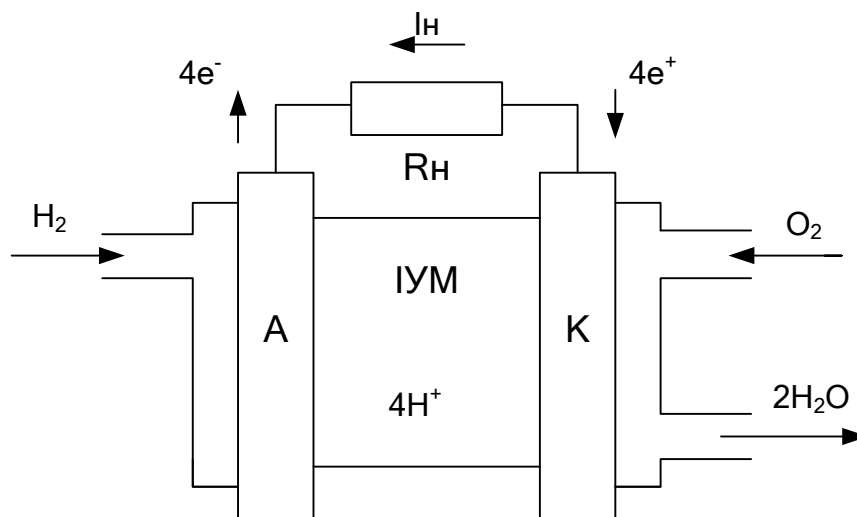


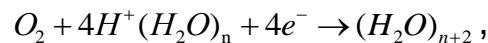
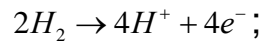
Рисунок 6.3 – ПЕ з іонно-утворювальною мембраною

Між пористими катодом і анодом затиснута іонно-утворювальна мембрана.

Для іонно-утворювальних мембран використовуються синтетичні квазітверді матеріали, які являють собою типовий гелій у вигляді фторотримуючого високополімерного з'єднання – фторуглеродного

аналога тефлону. Відмінною особливістю ІУМ є здатність обмінювати власні іони на іони, які присутні у навколишньому середовищі.

На аноді водень, що підводиться, іонізується:



а вода видаляється дренажем.

Існують паливні елементи з капілярними мембранами (КМ). КМ являє собою азбестове молоко, заповнене електролітом. Процеси ідентичні, як і з рідким електролітом.

6.3 Зовнішні характеристики паливних елементів

1. Максимальна енергія, яку може розвинути ПЕ за певний проміжок часу:

$$dW = Eiddt = Edq,$$

$$\Delta W_e = E_n F_a = -\Delta \Phi_T.$$

2. ЕРС і густину струму ПЕ може бути подано

$$E = \frac{-\Delta \Phi}{nF_a}, \text{ де } F_a \text{ – число Фарадея,}$$

$$I = \frac{I}{S_e} [A/m^2] \text{ – густина струму.}$$

На рисунках 6.4, 6.5 наведено схему роботи паливного елемента з різними за типом мембранами.

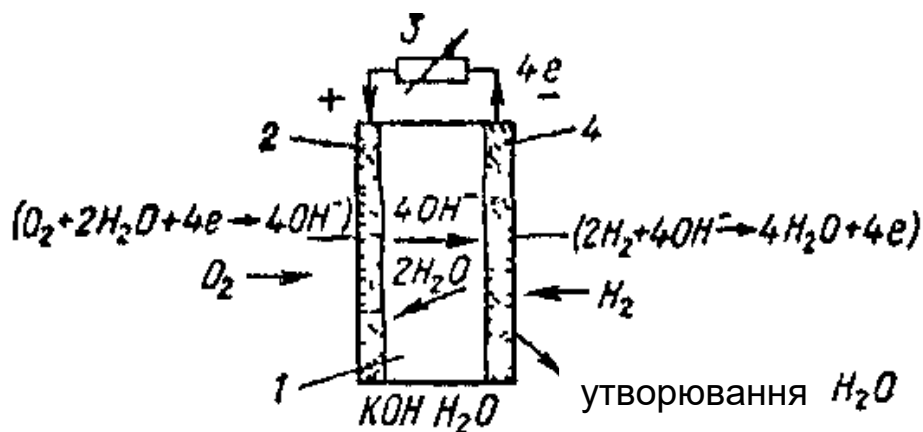


Рисунок 6.4 – Схема роботи ПЕ з матричною мембраною

Залежно від типу електроліту ПЕ бувають:

- 1) з рідким електролітом;
- 2) з капілярною мембраною;

- 3) з ІОМ при високій температурі;
- 4) з ІОМ при низькій температурі.

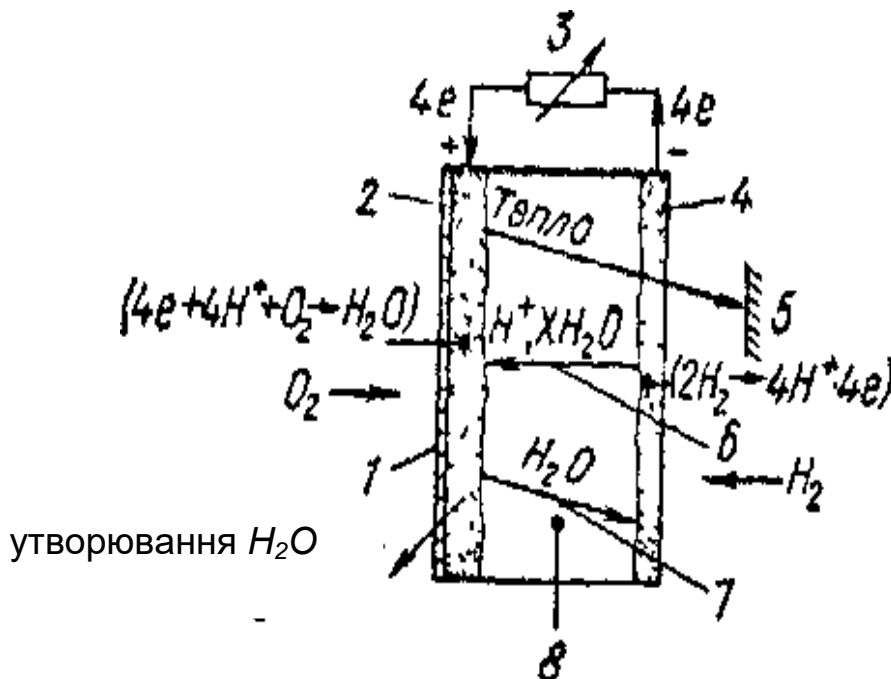


Рисунок 6.5 – Схема роботи ПЕ з іонно-утворювальною мембраною
($T_{роб} = 82^\circ C$)

6.4 Електролізні комірки

Для регенеративних систем водневої енергетики важливим є замкнутий цикл виробництва і використання водню. Для цього використовують електролізні комірки (ЕК) при потужностях більше 1кВт з роздільним використанням водню, менше 1 кВт - зі спільним використанням водню. Для малих потужностей – ПЕ з регенеративним накопичувачем.

Відомо багато конструкцій ЕК. ЕК складається з анода, катода і діафрагми (рисунок 6.6).

На відміну від ЕК з вільним електролітом (ЕК типів "а", "б", "в") в ЕК типу "г" застосовується матричний електроліт у вигляді капілярної мембрани. Основу матриці зазвичай становить азбестова мембрана, яка одночасно виконує роль розділової діафрагми.

Різні типи ЕК:

- 1) стаціонарні;
- 2) лужні електролізери;
- 3) твердополімерні електролізери;

4) високотемпературні електролізери.

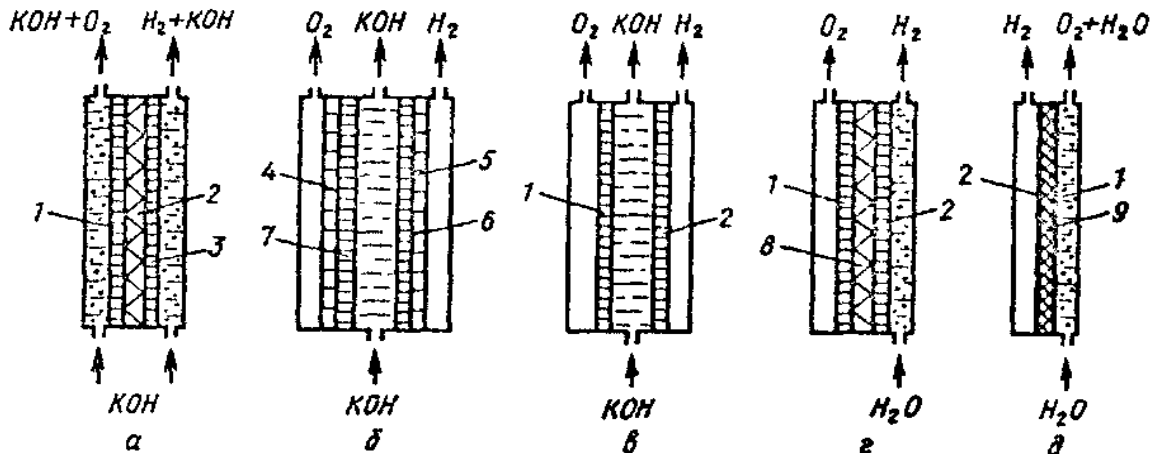


Рисунок 6.6 – ЕК основних типів:

а – з циркулюючим електролітом; б – з вентильними електродами; в – з дифузійними електродами; г – з матричним електролітом на основі капілярної мембрани; д – з матричним електролітом на основі іонообмінної мембрани: 1 – анод; 2 – катод; 3 – діафрагма; 4 – робочий шар анода; 5 – робочий шар катода; 6 – запірний шар катода; 7 – запірний шар анода; 8 – капілярна мембрана; 9 – іонообмінна мембрана

Напруга, що необхідна для роботи ЕК, може бути такою:

$$U = E_{EK} + \Delta U_{om} + \Delta E_k + \Delta E_a,$$

де E_{EK} – ЕРС ЕК як каталізатора;

ΔU_{om} – омичне падіння напруги на газових переходах;

$\Delta E_k, \Delta E_a$ – ЕРС поляризації катода і анода.

Втрати від E_0 :

на $\Delta U_{om} \approx (25...30) \%$;

$\Delta E_k \approx (27...30) \%$;

$\Delta E_a \approx (43...45) \%$.

7 ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ВОДНЕВИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Класифікація установок з регенеративним використанням водню:

РЕУ H_2 → Сумісні функції ПЕ і ЕК
 → Роздільні функції ПЕ і ЕК

Спосіб реалізації регенеративного циклу

За електролітом: кислотний, лужний, вільний, матричний, капілярний мембранний та з використанням іонообмінної мембрани.

За типом системи зберігання реагентів: газобалонні, криогенні, комбіновані.

За цільовим призначенням: акумулювання електроенергії, акумулювання електроенергії та водневе постачання, воднево-кисневе постачання.

Проектний розрахунок ПЕ

Розрахунок потужності батареї ПЕ:

$$N_{\delta} = \frac{A \cdot N_H}{\prod_{i=1}^n \eta_i},$$

де A – коефіцієнт, що враховує потребу електрохімічного генератора в електричній енергії на власні потреби;

η_i – коефіцієнт напівпровідникової дії від батареї споживача;

N_H – потужність навантаження;

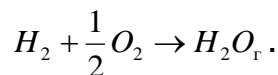
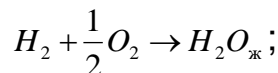
η – ЕРС ПЕ і його ККД:

$$E = \frac{-\Delta H^{\circ}}{n + F} + \frac{T\Delta S^{\circ}}{n \cdot F},$$

де ΔH , ΔS – ентальпія, ентропія, ентальпія при стандартних умовах;

F – число Фарадея;

n – кількість електронів в реакції:



$$\begin{array}{cc} \Delta S \frac{\text{Дж}}{\text{мольК}}, & \Delta H \frac{\text{Дж}}{\text{моль}} \\ -163,5 & -2,865 \times 10^5 \\ -45,4 & -2,865 \times 10^5 \end{array}$$

$$\eta_T = 1 - \frac{T\Delta S^{\circ}}{\Delta H^{\circ}};$$

$$\Delta H = \Delta H^{\circ} + \int_0^T \Delta C_p dT;$$

$$\Delta S = \Delta S^{\circ} + \int_0^T \Delta C_p d(\ln T),$$

C_p – теплостійкість всієї реакції при $p = \text{const}$:

$$\Delta C_p = \sum \nu_j \cdot C_j - \sum \nu_i \cdot C_i$$

$$E = -\frac{\Delta H^\circ}{n \cdot F} - \frac{1}{n \cdot F} \int_0^T \Delta C_p dT + \frac{T}{n \cdot F} \left(\Delta S^\circ + \int_0^T \Delta C_p d(\ln T) \right).$$

$$\eta_T = 1 - \frac{T \cdot \left(\Delta S^\circ + \int_0^T \Delta C_p d(\ln T) \right)}{\Delta H^\circ + \int_0^T \Delta C_p dT}.$$

Для вузького діапазону температур:

$$E = E^\circ + \frac{dE}{dT} \cdot T; \quad \eta_T = 1 + \frac{d\eta_T}{dT} T.$$

$\frac{dE}{dT} = -0,85 \text{ мВ/}^\circ\text{К}$; $\frac{d\eta_T}{dT} = -2,340^{-4} \% / ^\circ\text{К}$ для рідкої фази:

$$E = E^\circ + \frac{RT}{4F} \ln(P_{H_2}^2 \cdot P_{O_2});$$

$$E = E^\circ + \frac{RT}{4F} \ln\left(\frac{P_{H_2}^2 \cdot P_{O_2}}{P_{H_2O}^2}\right).$$

Розрахунок ВАХ ПЕ:

$$U = E - \Delta E - I \cdot r;$$

$$U = E - \epsilon_a \lg \frac{J_\Gamma}{i_{oa}} + \frac{2,3RT}{Z_a F} \lg \left(1 - \frac{J_\Gamma}{i_{пра}} \right) - \epsilon_\kappa \lg \frac{J_\Gamma}{i_{ок}} + \frac{2,3RT}{Z_\kappa F} \lg \left(1 - \frac{J_\Gamma}{i_{прк}} \right) - J_\Gamma \rho L_{ел},$$

де J_Γ – питома густина струму генератора;

i_{oa} , $i_{ок}$ – струми обміну анода і катода;

$i_{пра}$, $i_{прк}$ – примежові густини струму анода і катода;

ϵ_a , ϵ_κ – ефективні коефіцієнти анода і катода;

$L_{ел}$ – відстань між електродами;

ρ – питома електропровідність електроліту;

Z_a , Z_κ – комплексні опори анода і катода.

Розрахунок потужності ПЕ.

$$N_i = U_i \cdot J_{\Gamma i} \cdot S_\Gamma,$$

де N_i потужність ПЕ в i -ї точки ВАХ;

U_i – напруга;

$J_{\Gamma i}$ – густина струму;

S_Γ – площа робочої поверхні електрода.

Ефективний ККД ПЕ:

$$\eta_{Еф} = \eta_T \cdot \eta_H \cdot \eta_\Phi,$$

де η_H – ККД напруги;

η_Φ – фарадеївський ККД;

$$\eta_H = \frac{U}{E},$$

$$\eta_{\Phi} = \frac{q_p}{nF}, \quad \eta_{\Phi} = (0,7...0,95),$$

де q_p – кількість електрики, одержуваної від одного заряду.

Питомі параметри ПЕ:

$$V_N = \frac{V_E}{N},$$

$$V_E = (1 + \alpha) S_{\Gamma} l_{ПЕ},$$

де α – коефіцієнт враховує неробочу частку ПЕ;

$l_{ПЕ}$ – товщина ПЕ,

$$V_N = \frac{(1 + \alpha) \cdot S_{\Gamma} \cdot l_{ПЕ}}{U \cdot J_{\Gamma} \cdot S_{\Gamma}} = \frac{(1 + \alpha) \cdot l_{ПЕ}}{U_{ПИТ}},$$

$$m_N = \rho_E V_N = \frac{(1 + \alpha) \cdot l_{ПЕ}}{U_{ПИТ}} \rho_E,$$

де ρ_E – питома щільність електроліту конструкції.

Розрахунок кількості ПЕ в ЕХГ

Розрахунок кількості ПЕ в електрохімічному генераторі:

$$n_B = \frac{U_{НБ}}{U_E^P \beta_{НБ}},$$

де $\beta_{НБ}$ – коефіцієнт зменшення напруги батареї через неузгодженості характеристик окремих елементів;

$U_{НБ}$ – необхідна напруга батареї;

U_E^P – робоча напруга елемента.

Паралельне включення:

$$n_i = \frac{I_B}{I_E^P \beta_I} \cdot n_{\Sigma} = n_U \cdot n_I.$$

Розрахунковий режим роботи:

$$U_{роз} = U_E \cdot n_U \cdot \beta_U; \quad I_{роз} = I_{Ei} \cdot n_I \cdot \beta_I.$$

Електролізна комірка

Теоретичне значення напруги електролізу:

$$E_0 = l_a - l_k,$$

$$l = \frac{\Delta C_1}{n \cdot F}, \quad \Delta C_1 \frac{\text{Дж}}{\text{МОЛЬ}},$$

$$\Delta C_{1k}^o = 0; \quad \Delta C_{1a}^o = 237531 \frac{\text{Дж}}{\text{МОЛЬ}},$$

$$l_k^o = 0; \quad l_a^o = 1,23B.$$

Реальні значення електролізу:

$$E = E_0 + n_k + n_a + l_{kn} + l_{\delta} + IR_E + IR_M,$$

де n_k, n_a – напруга виділення водню на катоді, кисню на аноді;

l_{kn}, l_{δ} – концентраційна і дифуздна поляризація;

R – опір електроліту.

Тепловий баланс електролізної комірки

Тепловий баланс ЕК розраховується таким чином:

$$W = I \cdot E \cdot t = \frac{\omega_x}{E_x} + \omega_T,$$

де ω_x – електроенергія, що витрачається на хімічне розкладання;

ω_T – електроенергія, яка перетворюється в тепло:

$$I \cdot E \cdot t = I \cdot E_x \cdot t + \omega_T,$$

$$\omega_T = I \cdot T(E - E_x).$$

Ефективність електролізу

Коефіцієнт виходу по струму і корисного використання енергії:

$$\eta = \frac{V_O}{V_T},$$

де V_O – об'єм отриманого газу;

V_T – теоретичний розрахунок об'єму газу,

$$\eta' = \frac{E_x \eta}{E}.$$

Кількість газів, що виділилися

Об'єм газів, що виділилися:

$$V_{H_2} = 419 \cdot I \cdot n \cdot t \cdot \eta / 1000,$$

$$V_{O_2} = 209,5 \cdot I \cdot n \cdot t \cdot \eta / 1000.$$

Визначення запасу реагентів

Для визначення запасу реагентів потрібно розрахувати масу реагентів

$$m_A = \frac{K_{\text{эф-т}}}{V_p}; \quad K_{\text{эф-т}} = M_p \left(1 + \frac{m_r}{m_p} \right) / (z \cdot F \cdot \eta_F),$$

де M_p – молекулярна маса реагентів;

m_r – маса тари;

m_p – маса реагентів;

z – кількість електронів.

У таблиці 7.1 наведено показники зберігання реагентів водневих систем.

Таблиця 7.1 – Показники зберігання реагентів водневих систем

Спосіб зберігання	M/W [г/кВт·год]		
	H ₂	O ₂	Усього
Без урахування тари	44	350	394
Сталеві балони 150 кг/см ²	5000	3200	8200
Спеціальні балони (композитні матеріали)	1400	2400	3800
Кріогенний	185	450	635

Сучасні металогідрідні системи основані на можливості деяких елементів пов'язувати водень.

8 ТЕПЛОВЕ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ

Тепловим акумулюванням називається накопичення, зберігання і видача теплової енергії спеціальними теплоакумулювальними матеріалами (ТАМ).

Теплове акумулювання за технологією можна класифікувати за трьома видами:

- 1) акумулювання фізичного тепла,
- 2) акумулювання тепла оборотних фазових перетворень,
- 3) акумулювання тепла оборотних хімічних реакцій.

Найбільш ефективним є акумулювання фізичного тепла. Низька теплоємність компенсується використанням великих обсягів таких матеріалів.

Теплові ефекти оборотних фазових переходів характеризуються більш високою густиною енергії при малому об'ємі ТАМ і при постійній температурі.

Найбільш високу густину енергії мають оборотні хімічні реакції (теплові хімічні акумулятори), але їх створення пов'язане зі значними труднощами через обмежене число матеріалу теплового хімічного акумулювання.

8.1 Застосування теплових акумуляторів у системах електрозабезпечення

Для забезпечення безперервної роботи системи електрозабезпечення КА з первинними джерелами на основі прямих перетворювачів теплової енергії в електричну найбільш вигідним є застосування теплових акумуляторів енергії, які накопичують тепло на освітленій ділянці орбіти і звільняють його на затемненому місці.

Для сучасних СЕЗ використовуються теплові акумулятори на основі фазових перетворень (випаровування, плавлення, сублімація).

Акумулятори теплової енергії можна класифікувати за способом їх розміщення в системі живлення і тепловому зв'язку між акумулятором і перетворювачем.

На практиці реалізуються два способи розміщення акумулятора в системі живлення:

- 1) акумулятор об'єднують з приймачем променистої енергії;
- 2) акумулятор виконують автономно.

Механізм теплового зв'язку може бути конвективним, теплопровідним, з випромінюванням, комбінованим.

Приклади теплового акумулювання

Тепловий акумулятор з поєднаним приймачем променистої енергії показано на рисунку 8.1.

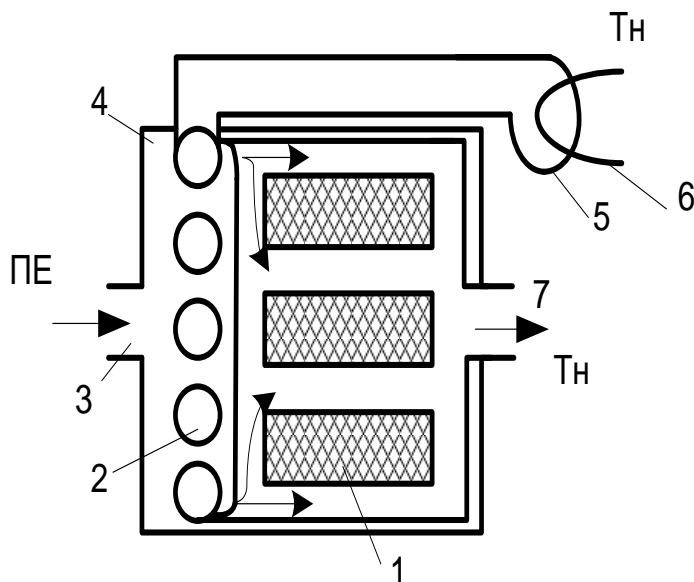


Рисунок 8.1 – Схема теплового акумулятора з поєднаним приймачем променистої енергії: 1 – теплоакумлювальний елемент; 2 – теплообмінник; 3 – входний отвір приймача; 4 – корпус; 5 – насос; 6 – вхід теплоносія; 7 – вихід теплоносія

Схему з приймачем-парогенератором і тепло-акумулятором зображено на рисунку 8.2.

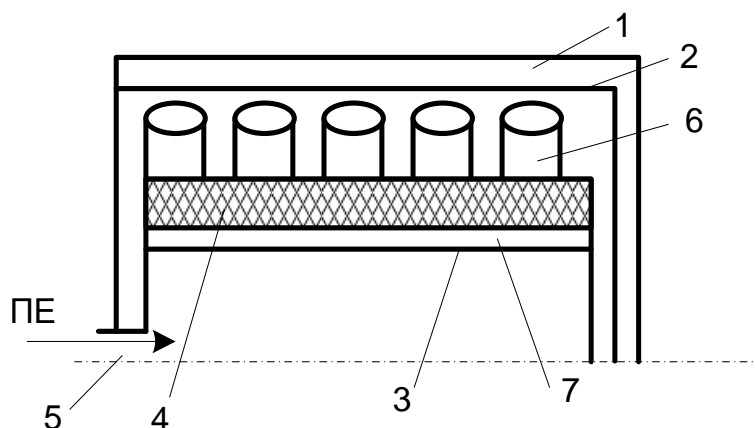


Рисунок 8.2 – Схема з приймачем-парогенератором і ТА: 1 – вакуумна порожнина приймача; 2 – екранування; 3 – стінка, яка приймає промені; 4 – теплоакумлювальний матеріал; 5 – входний отвір; 6 – теплообмінник; 7 – внутрішні екрани

СЕЗ з автономним тепловим акумулятором показано на рисунку 8.3.

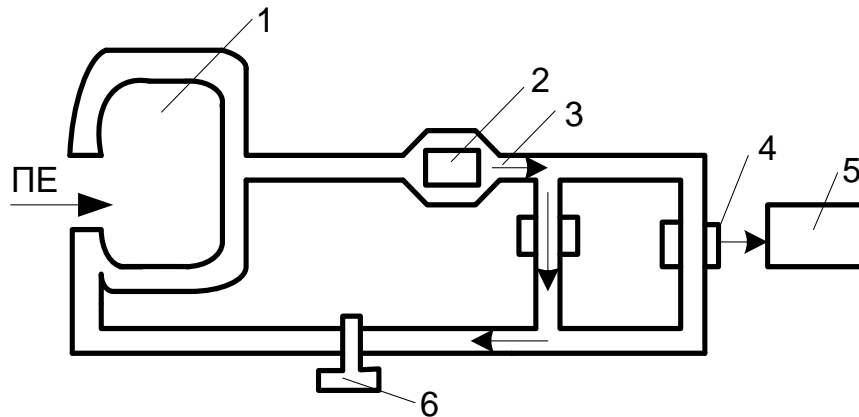


Рисунок 8.3 – Схема системи електрозабезпечення з автономним ТА:
1 – приймач ПЕ; 2 – ТА; 3 – теплоносій; 4 – перетворювач енергії;
5 – навантаження; 6 – насос

Схему акумулювання тепла з тепловими трубами наведено на рисунку 8.4.

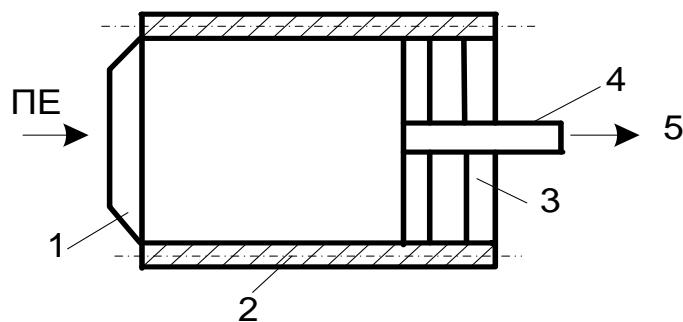


Рисунок 8.4 – Схема акумулювання тепла з тепловими трубами: 1 – приймач; 2 – первинна теплова труба; 3 – теплоакумлювальний матеріал;
4 – вторинна теплова труба; 5 – перетворювач

Усі схеми показують, як треба застатися теплом і віддати його у рекомендований час.

8.2 Теплоакумлювальні матеріали

Основними вимогами до ТАМ при їх практичному використанні є їх температура і теплота плавлення.

Теплоакумлювальні матеріали мають забезпечити можливість багаторазового заряду і розряду, при постійному рівні енергетичної ефективності. Крім того, ці матеріали повинні забезпечувати високу теплову ємність в одиниці маси і об'єму.

Густина акумулювання теплоти значною мірою залежить від методу акумулювання і виду речовини. Вона може бути акумульована в хімічно

зв'язаному вигляді в паливі. При цьому щільність акумулювання відповідає теплоті згоряння: нафта - 11.3 кВт·год / кг; вугілля (умовне паливо) - 8.1 кВт·год / кг; водень - 33.6 кВт·год / кг; деревина - 4.2 кВт·год / кг. При термохімічному акумулюванні теплоти в цеолітах (процеси адсорбції - десорбції) може акумулюватися 286 Вт·год / кг теплоти при різниці температур 55° С. При фазових переходах речовини (плавлення - затвердіння) щільність акумулювання значно вище: лід - 93 Вт·год / кг; парафін - 47 Вт·год / кг; гідрати солей неорганічних кислот - 40 ... 130 Вт·год / кг.

Для низькотемпературних сонячних систем тепlopостачання в АК фазового переходу найбільш придатні органічні речовини (парафін і деякі жирні кислоти) і кристалогідрати деяких неорганічних солей, наприклад гексогідрат хлористого кальцію або глауберової сіль, що плавляться при температурі 29 ... 32° С.

Таблиця 8.1 – Основні показники деяких теплоакумулювальних матеріалів

Матеріал	$T_{пл}, ^\circ K$	$Q_{пл}, Вт \cdot год / кг$
LiH	961	645...750
LiF	1118	268
NaF	1273	220
Be	1555	420
Si	1700	495
Mg ₂ Si	1379	230
MgF ₂	1536	255
CoSi ₂	1600	240
TiSi ₂	1818	310

При використанні кристалогідратів можливий поділ суміші і її переохолодження, що спричиняють нестабільність цих вартісних речовин і знижують число робочих циклів. Для усунення цих недоліків до теплоакумулювального матеріалу додають спеціальні речовини, які забезпечують рівномірну кристалізацію розплаву і сприяють тривалому використанню матеріалу в багаторазових циклах плавлення-затвердіння.

Для організації ефективного теплообміну застосовують ребрені поверхні, капсули, заповнені теплоакумулювальним матеріалом, а також теплопровідні матриці. Це необхідно, в першу чергу, при використанні органічних речовин, що мають дуже низький коефіцієнт теплопровідності (0,15 Вт / м · С°).

Комплекс вимог, що пред'являються до теплоакумулювальних матеріалів, такий, що найбільш придатним для використання процесів у цей час вважається акумулювання прихованої теплоти плавлення. Це спричинено тим, що плавлення відбувається ізотермічно при постійному тиску, і, отже, акумулятори, робота яких основана на цьому принципі,

дозволяють накопичувати і вивільняти енергію практично при незмінному температурному рівні. Значення прихованої теплоти плавлення відомих матеріалів такі, що розміри і маса космічних акумуляторів у більшості випадків цілком прийнятні для практичного використання. Крім того, процес плавлення для більшості відомих речовин є майже повністю оборотним, що дозволяє розраховувати на можливість забезпечення необхідного ресурсу (порядку десятків тисяч годин) [1].

Таблиця 8.2 - Властивості твердих і рідких теплоакумулювальних матеріалів

Матеріал	ρ , кг/м ³	C , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	Теплоакумулювальна спроможність при $\Delta T=20K$, МДж/м ³
Вода (тиск 0.1 МПа)	1000	4.19	0.6	73.4
Вода (тиск 1МПа)	920	4.32	0.69	79.5
Камінь (природний)	3100	0.83		52.6
Бетон (з легким заповнювачем)	1000	1.04	0.35	20.9
Залізобетон	2200	1.08	1.56	47.5
Цегла	1700	0.83	0.75	27.4
Деревина	800	1.55	0.21	25
Сталь	7800	0.47	58	73.4
Пісок сухий	1500	0.83	0.58	25
Земля суха	1000-2000	0.83	0.17-0.58	16.6-50.4
Галька	2640	0.86	1.7-4	45.6
Рідкий натрій	960	1.26	67.5	24.2
Суміш 40 % NaNO ₃ + 54 % KNO ₃	1733	1.55	0.57	53.6

Як теплоакумулювальні матеріали теплових акумуляторів необхідно використовувати речовини, що стабільні при плавленні. Зараз відомо досить велике число таких речовин, які мають великі значення прихованої теплоти плавлення і точки плавлення, що лежать в згаданому вище діапазоні температур (від 900 до 2000 К), тому для більшості розглянутих у певний час прикладних задач цей температурний рівень лежить у цих межах. Це так звані високотемпературні акумулятори. Оскільки плавлення цієї речовини відбувається при постійній температурі, тепловий акумулятор зазвичай розраховують на один температурний рівень, відповідний точці плавлення використовуваного теплоакумулювального матеріалу. Якщо акумулятор тепла буде працювати при інших температурних умовах, у цьому випадку температурний рівень, який він

забезпечує, буде сильно змінюватися з плином часу, оскільки при цьому тепла енергія в ньому буде запасатися за рахунок теплоємності, а не через приховану теплоту плавлення. Властивості теплоакумулювальних речовин наведено в таблицях 8.2 – 8.4.

Найбільш ефективний теплоакумулювальний матеріал у рідинних сонячних системах тепlopостачання - це вода. Для сезонного акумулювання теплоти перспективне використання підземних водойом, ґрунта, скальної породи та інших природних утворень.

Таблиця 8.3 – Властивості теплоакумулювальних речовин фазового переходу

Речовина	T _{пл.} , °C	ρ, г/см ³		λ, Вт/(м×К)		С, кДж/(кг×К)		Ентальпія фазового переходу	
		тверда фаза	рідка фаза	тверда фаза	рідка фаза	тверда фаза	рідка фаза	кДж/кг	МДж/м ⁻¹
Неорганічні речовини									
CaC ₁₂ ×6H ₂ O	29.2	1.62	1.5	0.6	0.3	1.47	1.47	172.5	258.1
Ma ₂ SO ₄ × ×10H ₂ O	32.4	1.46	1.41	0.5	0.3	1.76	3.31	251	345.2
Ma ₂ HPO ₄ × ×12H ₂ O	35.2	-	1.42	0.5	-	1.55	3.18	279	403.2
Органічні кислоти									
Лауринова	44	-	0.91	0.4	0.2	-	-	175.3	159.6
Меристинова	54.1	-	0.87	-	-	1.6	2.26	187.8	162.8
Пальмітинова	65	-	0.88	-	-	1.8	2.73	184.5	162.9
Стеаринова	70.1	-	0.95	-	0.2	1.67	2.3	200.3	191
Парафіни									
Парафін	22	0.9	0.77	0.3	0.2	2.91	-	187.8	144
Октадекан	28	-	0.79	-	0.1	2.1	2.17	244.2	194.1
н-Ейкозан	36.7	0.86	0.78	-	0.2	2.01	2.21	247	192

У крупномасштабних системах акумулювання теплоти достатньо успішно застосовують залізобетонні та сталеві резервуари вмістом до 100 тис. м³, в яких гаряча вода має значну теплоємність (4,19 кДж / (кг · °C)), яку можуть зберігати при температурі 80 ... 95 °C до 8 тис. ГДж теплоти. Вони достатньо прості в експлуатації, але потребують більших капіталовложень.

Таблиця 8.4 – Характеристики ТАМів

ТАМ, склад і процентне масове співвідношення	T _{плавл} , °C	Теплоємність до фазового переходу, Вт·год/кг	Теплоємність фазового переходу, Вт·год/кг	Питома енергія	
				Вт·год/кг	Вт·год/л
K, Na, Li/NO ₃ +KA(20...80 %)	87	19,1	43,2	62,3	90,9
K, Na, Li/NO ₃ +KA(50...50 %)	30	4,7	40,4	45,1	75,9
K, Na, Li/NO ₃ +KA(30...70 %)	78	29,9	40,3	70,2	110,9
K, Na, Li/NO ₃ +KA(40...60 %)	63	22,6	47,0	69,6	119,0
K, Na, Li/NO ₃ +AA(30...70 %)	48	13,5	56,1	69,6	103,2
K, Na, Li/NO ₃ +AA(40...60 %)	33	5,0	43,3	48,3	64,7
K, Na/NO ₃ +AA(13...97 %)	28	0,9	43,8	44,7	59,0
K, Na/NO ₃ +KA(15...85 %)	115	35,4	31,4	66,8	99,5
NaNO ₂ +NaNO ₃ +KNO ₃ (40...7...53 %)	90	15,8	36,6	52,4	118,4
K, Na, NH ₄ /NO ₃ +KA(80...20 %)	75	18,1	45,2	60,4	91,2
K, Na, NH ₄ /NO ₃ +KA(60...40 %)	35	4,9	41,3	44,2	72,4
K, Na, NH ₄ /NO ₃ +KA(50...50 %)	45	12,8	54,8	65,4	93,5
K, Na, NH ₄ /NO ₃ +KA(20...80 %)	100	34,6	30,2	62,8	92,4
K, Na, NH ₄ /NO ₃ +AA(70...30 %)	84	18,9	40,1	69,2	100,3
K, Na, NH ₄ /NO ₃ +AA(40...60 %)	51	13,8	56,5	70,1	102,3
K, Na, NH ₄ /NO ₃ +AA(20...80 %)	60	21,5	48,6	66,4	111,5

Доцільне їх використання сумісно з тепловими насосами, тоді їх теплоакумулювальна спроможність може подвоїтися за рахунок більш глибокого (до 5 °C) охолодження води у резервуарі.

Проведення досліджень на корозійну стійкість конструкційних матеріалів у нових теплоакумулювальних засобах показало, що ряд поширених матеріалів (МО, Д16Т, АМГ-7М, АМЦ, Ст-3, 15ХН) є досить стійкими в розплавах теплоакумулювальних сумішей.

Крім температури і прихованої теплоти плавлення для розрахунку акумулятора тепла необхідно знати також теплофізичні властивості теплоакумулювальних матеріалів, зокрема, теплопровідність, щільність, питому теплоємність і змінення питомого обсягу при фазовому переході. Деякі відомості є у загальнодоступних довідниках, однак для більшої частини наведених у таблиці 8.3 речовин (особливо для рідкої фази) ці відомості відсутні, і тому доводиться проводити відповідні експериментальні дослідження. В якості даних для оцінювання параметрів теплових акумуляторів можна використовувати значення теплопровідності гідриду фториду літію. Слід також зазначити, що при плавленні питомий об'єм цих речовин збільшується на 16 і 30 % відповідно.

При виборі теплоакумулювального матеріалу для конкретної системи необхідно, перш за все, знати температурний рівень, на якому повинна запасатися і вивільнятися енергія. Так, для температурного рівня ≈ 950 К можливе використання гідриду літію, який, до речі, має найбільш відоме на сьогодні значення прихованої теплоти плавлення. Для температурного рівня ≈ 1100 К відповідним матеріалом є фторид літію, який також має високу теплоту плавлення. Слід зазначити, що за необхідності підтримки постійного температурного рівня в процесі проектування конкретної теплової системи з акумулятором тепла для забезпечення прийнятних масових характеристик доводиться вибирати температурний рівень основної системи таким чином, щоб він відповідав точці плавлення найкращого теплоакумулювального матеріалу. Як впливає з таблиці 8.3, одним з перспективних методів отримання теплоакумулювального матеріалу з потрібними властивостями є створення бінарних і тернарних евтектик речовин з великою теплотою плавлення.

8.3 Порівняння різних ТАМ

За хімічним складом і рівнянням температур фазового переходу, ТАМ можна поділити на три основні групи:

1) АК працюють при температурі 300...400 К - кристалогідрати неорганічних солей, гіпосульфід натрію;

2) при більш високих температурах використовують органічні речовини - парафін, поліетилен високого тиску, пентаерітріол та інші. Застосування цих речовин практично повністю знімає питання корозійного руйнування корпусу АК, забезпечує високу густину енергії, що запасується, і непогані технологічні показники. Існує брак зниження теплоти фазового переходу, внаслідок руйнувань тривалих ланцюжків молекул полімерів, які відбуваються під дією високих температур;

3) високотемпературні теплоакумулювальні речовини - легкі метали, їх сполуки і сплави. Матеріали цієї групи поділяють на чисті речовини, бінарні й потрійні суміші.

Порівняємо теплоакумулювальні матеріали (таблиця 8.5).

Клас чистих речовин, які застосовуються у високотемпературному акумулюванні, підрозділяють на кілька підкласів:

- гідроокисли і гідриди – LiH, LiOH, NaOH, KOH, LiOH;
- карбонати – Li_2CO_3 , Na_2CO_3 , K_2CO_3 ;
- метали – Bi, Al, Ge;
- нітрати – LiNO_3 , NaNO_3 , KNO_3 ;
- фториди – LiF, NaF, MgF_2 .

Таблиця 8.5 – Порівняння деяких теплоакумулювальних матеріалів

Характеристика ТАМ	Граніт, галька	Вода	Глауберова сіль (декагідрат сульфату натрію)		Пара- фін
Щільність, $\text{кг}/\text{м}^3$	1600	1000	1400 ^T	1330 ^P	786 ^T
Теплоємність, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	0,84	4,2	1,92 ^T	3,26 ^P	2,89 ^T
Коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,45	0,6	1,85 ^T	1.714 ^P	0,498 ^T
Маса ТАМ для акумулювання 1ГДж теплоти при $\Delta T = 20\text{ К}$, кг	59500	11 900	3300		3750
Відносна маса ТАМ відносно маси води, $\text{кг}/\text{кг}$	5	1	0,28		0,32
Об`єм ТАМ для акумулювання 1 ГДж теплоти при $\Delta T=20\text{ К}$, м^3	49, 6 ^Ж	11,9	2,26		4,77
Відносний об`єм ТАМ відносно об`єму води, $\text{м}^3/\text{м}^3$	4,2	1	0,19		0,4

Примітки: 1. Позначення степеня: т – твердий стан; р - рідкий стан;
* - з урахуванням об`єму пористості – 25 %.

2. Температура і теплота плавлення: парафін - 47° C і $209\text{ кДж}/\text{кг}$; глауберова сіль - 32° C і $251\text{ кДж}/\text{кг}$.

Особливу увагу при виборі речовин, що будуть застосовуватися як ТАМ, має бути приділено значенню теплоти і температури фазового

переходу. Характерна особливість, притаманна гідридам, гідроокислам і солям легких металів, - це низьке значення коефіцієнтів теплопровідності, а також істотна зміна обсягу в процесі фазового переходу. Ці негативні моменти потребують додаткових конструкторських рішень при проектуванні конкретного космічного апарату. Висока вартість чистих речовин негативно позначається на загальних економічних показниках установки.

Дорогий матеріал з хорошими теплоакумулювальними властивостями може бути використаний в суміші з дешевим, при цьому теплова ємність залишається майже незмінною. Але бінарні суміші при використанні їх у акумуляторах мають плавитися і укріплятися аналогічно гомогенним чистим речовинам. Ця умова виконується для двох спеціальних складів сумішей: евтектичної і дистектичної. Якщо суміш не відповідає умовам евтектики і дістектики, то в процесі плавління може статися ситуація, коли тверда фаза розпадається на рідину і іншу тверду фазу. Різні склади утворюються, і тому різні густини рідини і твердої фази можуть призводити до розшарування. Тому для цілей акумулювання придатні лише евтектичні і дістектичні суміші. Це ж справедливо і по відношенню до потрібних сумішей.

На підставі зазначеного вище можна зробити висновок, що хімічні речовини, які можуть бути використані в акумулюванні тепла, повинні мати такі важливі властивості:

- зручну, з урахуванням експлуатаційних умов, температуру плавлення;
- високі значення теплоти фазового переходу;
- хороші теплообмінні властивості, тобто високу теплопровідність у твердих і рідких фазах;
- високу теплоємність у твердих і рідких фазах, що збільшує ємність акумулятора за рахунок теплоємнісного акумулювання;
- відсутність тенденції до розшарування, температурну стабільність;
- низьке термічне розширення і незначну зміну обсягу при плавленні;
- слабку хімічну активність, що дозволяє використовувати недорогий матеріал для виготовлення обшивок ТА;
- безпеку, відсутність отруйних парів, а також небезпечних реакцій з робочим або теплообмінним середовищем;
- низьку вартість;
- мінімальні масові і габаритні характеристики.

9 ОСНОВИ І ПРИНЦИПИ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРІВ

За основні дані для розрахунку теплового акумулятора приймають:

- необхідну теплову ємність;
- режим надходження теплоти сонячного випромінювання в конкретному випадку.

Теплова ємність визначається так:

$$C_{TA} = Q_{TA} \cdot \tau_{THmax},$$

де Q_{TA} - теплова потужність; вона визначається тією електричною потужністю перетворювача, яку повинен віддати акумулятор за час теплової ділянки.

Маса ТАМ може бути визначена за формулою

$$M_{TAM} = \frac{Q_{TA} \cdot \tau_{THmax}}{L_{TAM} \cdot \eta_{TA}},$$

де L_{TAM} - ефективне значення прихованої теплоти плавлення;

η_{TA} - ККД теплового акумулятора, $\eta = 95\%$.

Повна маса ТА містить масу конструкції і масу додаткової кількості цього матеріалу:

$$M_k = (0.2 \dots 0.8) (M_{TAM} + M_{доп}).$$

Масу додатково збільшують для підтримки температури на кінцевих ділянках і для кристалізаційних процесів.

Ступінь додаткового зниження температури:

$$Q = \frac{T_{пл} - T_{гран}}{T_{пл} - T_o},$$

де T_o - номінальна температура;

$T_{гран}$ - гранична температура ТА:

$$M_{доп} = f(\theta, St, Bi, \Phi),$$

де St - середнє значення числа Стентона;

Bi - середнє значення числа Біо, яке характеризує теплопередачу в ТА;

Φ - фактор, що характеризує ТА різної форми.

Рівняння для розрахунку теплопередачі в акумуляторі тепла можна отримати з інтегральних рівнянь збереження маси, енергії, записаних для елементарного об'єму, який містить рідку, тверду фазу і межу їх розділу.

Рівняння збереження маси:

$$\iint_{i_s}^i (\rho \bar{\omega}) \bar{n} dS = \iint_{i_{s\phi}}^i (\rho \bar{\omega}) \bar{n} dS - \iint_{i_{s+}}^i (\rho \bar{\omega}) \bar{n} dS + \chi \iiint_{i_{v\phi}} \frac{\partial^i \rho}{\partial \tau} dV.$$

Рівняння збереження енергії:

$$\iint_{i_s}^i (q + \rho H \bar{\omega}) \bar{n} dS = \iint_{i_{s-}}^i (q + \rho H \bar{\omega}) \bar{n} dS - \iint_{i_{s+}}^i (q + \rho H \bar{\omega}) \bar{n} dS + \chi \iiint_{i_{v\phi}} \frac{\partial^i}{\partial \tau} (\rho H) dV.$$

Швидкість руху фронту розподілу фаз:

$$\bar{\omega}_\phi = {}^1 \bar{\omega}_\phi - \left(\frac{{}^1 q - {}^2 q}{{}^1 \rho^2} \right)_\phi = {}^1 \bar{\omega}_\phi - \frac{{}^2 (\lambda \Delta T)_\phi - {}^1 (\lambda \Delta T)_\phi}{{}^1 \rho^2 \phi},$$

$${}^2 \bar{\omega}_\phi = {}^1 \bar{\omega}_\phi + \left(\frac{{}^1 \rho - {}^2 \rho}{{}^1 \rho^2} \right)_\phi \left(\frac{{}^2 q - {}^1 q}{{}^1 \rho^2} \right)_\phi = {}^1 \bar{\omega}_\phi - \frac{{}^2 (\lambda \Delta T)_q - {}^1 (\lambda \Delta T)_\phi}{2} \left(\frac{{}^1 \rho - {}^2 \rho}{{}^1 \rho^2} \right)_\phi,$$

де

V – об'єм, обмежений замкнутою поверхнею S ,

ρ – густина,

$\bar{\omega}$ – вектор швидкості зміни фази,

\bar{n} – одиничний вектор.

H – ентропія,

q – густина теплового потоку,

λ – теплопровідність,

τ – час.

Індексація:

1 - тверда фаза,

2 - рідка фаза,

Φ - фронт плавлення,

$\chi = \text{const}$ – характеризує швидкість обміну щільністю рідкої, твердої фаз.

9.1 Принцип передачі тепла

Процес передачі теплової енергії в акумуляторі здійснюється так:

1. Внаслідок зміни температури ТАМ і стінок акумулятора виділяється або поглинається тепла енергія.

2. У просторі, який примикає до межі розділу фаз, виділяється або поглинається прихована теплота фазового переходу.

3. Енергія, що виділяється на режимі нагріву теплоносіїв, передається шляхом теплопровідності теплоакумулювального матеріалу при акумулюванні і назад при розряді акумулятора.

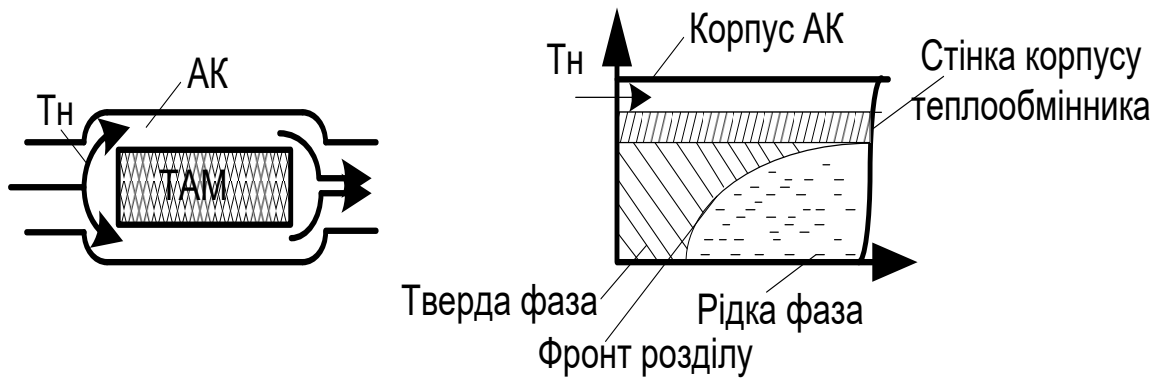


Рисунок 9.1 – Акумулятор повністю заряджений або ТАМ знаходиться в рідкому стані

При русі T_n навколо ТАМ відбувається фазовий перехід з рідкого стану у твердий, починаючи з першого калібру (рисунок 9.1).

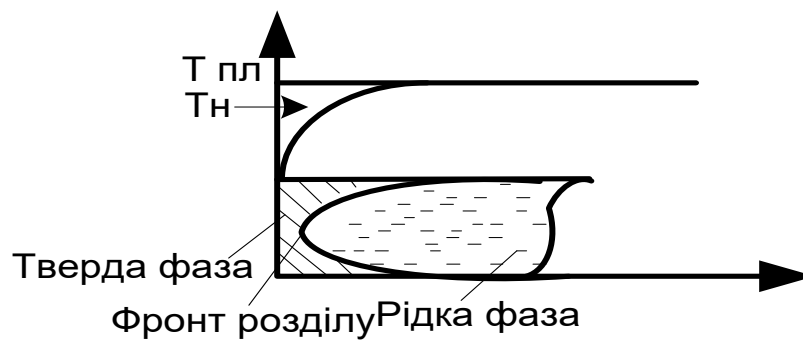


Рисунок 9.2 – Відображення процесів

Кінець періоду теплообміну або кінець розряду акумулятора (рисунок 9.2). Велика частина ТАМ перейшла у твердий стан (рисунок 9.3).

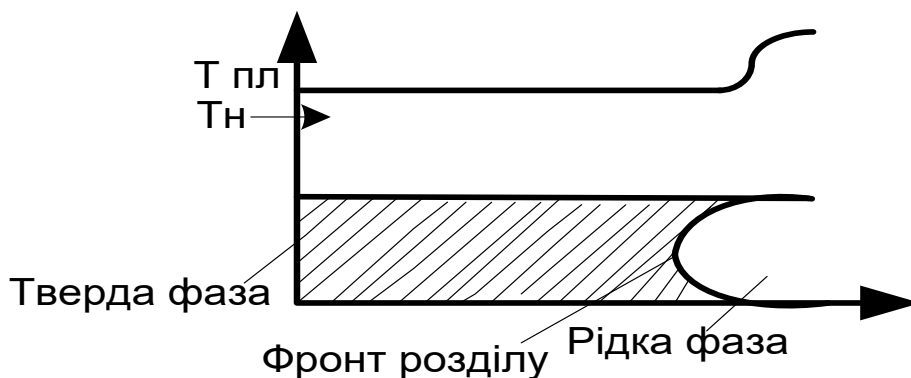


Рисунок 9.3 – Процес перетворення з твердої фази у рідку

Початок заряду акумуляторів. Перехід напочатку з твердої в рідку фазу (рисунок 9.4).

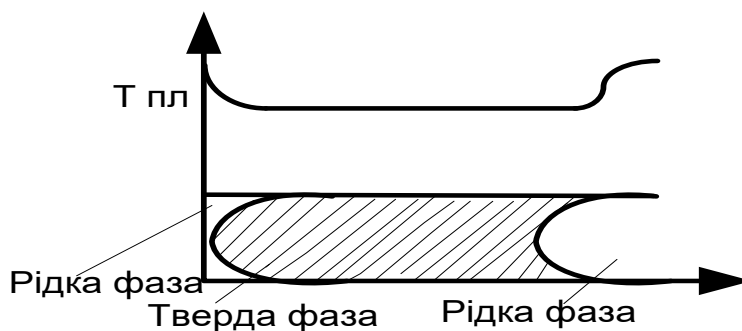


Рисунок 9.4 – Відображення процесу заряду акумулятора

Проміжний стан зображено на рисунку 9.5.

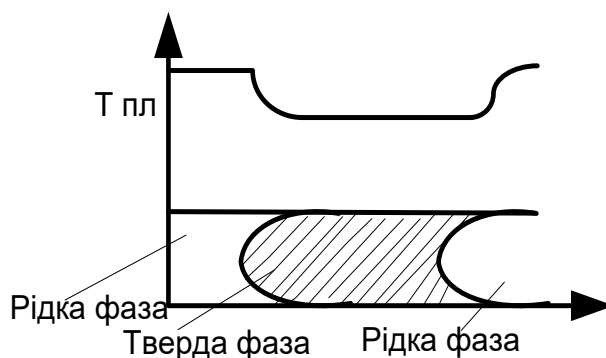


Рисунок 9.5 – Проміжний стан

Вирішення завдання теплообміну має містити дослідження процесів у рідині теплоносіїв, у стінці, у ТАМі з фазовим переходом у рідкий і твердий стан.

Перенесення тепла в рушійній нестисливій рідині:

$$\rho_p C_p \left[\frac{\partial T_p}{\partial \tau} + \text{div}(T_p \overline{\omega_p}) \right] = \text{div}(\lambda_p \text{grad} T_p).$$

Рівняння руху:

$$\frac{\partial \overline{\omega_p}}{\partial \tau} + (\overline{\omega_p} \text{grad} T_p) = -\frac{1}{\rho_p} \text{grad} P_p + \nu_p \Delta^2 \overline{\omega_p}.$$

Рівняння нерозривності:

$$\text{div}(\overline{\omega_p}) = 0;$$

Δ – дельта-функція;

C_p – теплоємність;

P_p – тиск;

λ_p – теплопровідність;

ν_p – в'язкість рідини.

Теплопровідність епелінта:

$$\rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda_w \text{grad} T_w).$$

Теплопровідність ТАМ зазнає фазового переходу:

$${}^i(\rho_{TM} C_{TM}) \frac{\partial T_{TM}}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda_{TM} \text{grad} T_{TM}).$$

Рівняння фронту розділу фаз:

$$\Phi(x, y, z, \tau) = 0,$$

$$\left\{ \left[{}^{i-1} \lambda_{TM} ({}^i P_-) \text{grad} {}^{i-1} T_{TM} ({}^i P_-) - {}^i \lambda_{TM} ({}^i P_+) \text{grad} {}^i T_{TM} ({}^i P_+) \right] \text{grad} {}^i \Phi \right\} + \rho_{TM} L_{TM} \frac{\partial {}^i \Phi}{\partial \tau} = 0,$$

де ${}^i P \in {}^i \Phi$;

L_{TM} – прихована теплота плавлення ТАМ;

${}^i P$ – точка на поверхні розділу фаз.

Рішення рівнянь стану теплового акумулятора є складним завданням, тому використовують ряд спрощень, які обмежують діапазон рішень випадком осової симетрії. Спрощення здійснюються введенням параметрів теплообміну числами Пекле, Нуссельта, Прандтля і т.д.

10 МЕХАНІЧНІ НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ

Механічним накопичувачем (МН) енергії, або акумулятором, називають пристрій для накопичення, зберігання і подальшої віддачі кінетичної або потенціальної енергії для здійснення корисної роботи. Під час заряду до механічного накопичувача підводиться енергія від зовнішнього пристрою, при розряді основна частина енергії витрачається на корисну роботу і компенсацію втрат.

Окремі види механічних накопичувачів знайшли масштабне застосування в електроенергетиці, наприклад, це гідроакумулявальні установки електричних станцій [3]. Зарядно-розрядний цикл їх роботи досягає десятків годин. Створення цих накопичувачів ґрунтується на положеннях теорії законів Ньютона, Гука, Менделєєва-Клапейрона і на основних засадах опору матеріалів.

Основні різновиди механічних накопичувачів енергії поділяються на *статичні, динамічні, комбіновані*.

Статичні МН енергії – запасують потенційну енергію за рахунок: пружної зміни форми, змінення об'єму, переміщення проти сили тяжіння.

Запасання і витрати енергії пов'язані з рухом МН, зберігання енергії здійснюється в статичному стані.

Динамічні МН акумулюють кінетичну енергію переважно в обертальних масах тіл. До цих накопичувачів можуть відносити прискорювачі.

Комбіновані МН одночасно запасують потенційну і кінетичну енергію. До них належать супермаховики з мінливими лінійними розмірами.

Механічні накопичувачі за умовами запаса енергії знаходяться в проміжку між хімічними і тепловими і значно перевершують ємнісні та індуктивні.

10.1 Статичні механічні накопичувачі. Конструктивні схеми

У статичному механічному накопичувачі немає руху, в ньому все врівноважено. При порушенні рівноважного стану відбувається робота. Такі накопичувачі не можуть запасати велику кількість, так як тоді вони матимуть величезні габаритні розміри і масу. Перевагою такого типу накопичувачів є низька питома енергія та великий термін запасання енергії.

Таким чином, накопичення потенційної енергії за допомогою пружного змінення форми або об'єму робочого тіла або при його переміщенні проти напрямку сили тяжіння у гравітаційному полі здійснюється статичним механічним накопичувачем енергії. Піднятий вантаж – це класичний приклад статичного накопичувача енергії. Тверде, рідинне або газоподібне робоче тіло цих МН має статичний стан у режимі зберігання енергії, а заряд-розряд накопичувача енергії супроводжуються рухом робочого тіла [1, 3].

Прикладами статичних МН є: розтягнуті або стислі пружини (рисунок 10.1 а, б), гуми; газобалонні акумулятори та пневмоакумулятори; ударні пристрої різних видів, наприклад, для забивання паль, які використовують енергію мас у піднятому стані; водосховища гідроакумулювальних електростанцій, баки водонапірних установок і т.д. До однієї групи статичних МН можна віднести МН, які в загальному випадку мають пружний елемент і виділення енергії відбувається за рахунок пружної деформації цього елемента їх $\eta=0,6..0,7$, спіральна пружина S-подібної форми з прожилком $\eta \leq 0,9$. Деталі з високою піддатливістю при мінімальних масі й габаритних розмірах називаються пружними елементами (пружини, ресори, гумові вироби). Їх використовують для амортизації поштовхів і ударів, демпфірування коливань, вирівнювання навантаження в зоні взаємодії сполучених ланок,

акумулювання енергії за рахунок сил пружних деформацій (пружинні двигуни), для силового замикання, вимірювання зусилля щодо величині пружного переміщення і т.д.

Поширеними пружними елементами є пружини, що працюють на розтяг-стиск, вигин, крутіння. Якщо порівнювати однакові за показниками міцності пружні елементи, то максимальна енергоємність буде у елементів розтягування – стиснення, вдвічі менше - кручення і втричі - вигину. На рис. 10.1, в, показана принципова схема МН, що містить гвинтову циліндричну пружину і гідравлічний пристрій. Окремою групою можна позначити МН з гумовими елементами: пружна деформація гумового елемента дає можливість накопичити в одиниці маси в десятки разів більше енергії, модуль пружності приблизно у кілька разів менше, ніж у сталі, і велике внутрішнє тертя зумовлюють хороші амортизувальні та демпфировальні властивості.

Недоліком гумових елементів є: недовговічність, невеликі за тривалістю статичні навантаження, велика кількість енергії йде на внутрішні втрати. Максимальна питома енергія таких пружних елементів - у межах 3 ... 5 кДж / кг.

Збереження накопиченої енергії в нерухомому стані:

$$W = \int_0^{\Delta h} F dx = \int_0^{\Delta h} N x dx = \frac{N \cdot \Delta h^2}{2} = \frac{F_{\Pi} \cdot \Delta h^2}{2}, \quad (10.1)$$

де W – повна збережена енергія пружного елемента;

Δh – переміщення;

F – сила, прикладена до пружного елемента;

$$F_{\Pi} = N \cdot \Delta h, \quad (10.2)$$

де N – реакція.

Питома енергія визначається формулою

$$W_{\text{пит}} = \frac{W}{M}, \quad (10.3)$$

де M – маса пружного накопичувача, $M = \gamma \cdot V = \gamma \cdot S \cdot h$ (γ – щільність).

Таким чином, питома енергія, пружини або стрижня об'ємом V і перетином S , з матеріалу щільністю γ працює на розрив у межах закону

Гука $\sigma = x \cdot E$, де E – модуль пружності (Юнга), $x_* = \frac{x}{h}$ - відносна деформація:

$$W_{\text{пит}} = \int_0^{\sigma_p} \left(\frac{\sigma}{\gamma \cdot E} \right) d\sigma = \frac{\sigma_p^2}{2 \cdot \gamma \cdot E}; \quad \sigma \leq \sigma_0. \quad (10.4)$$

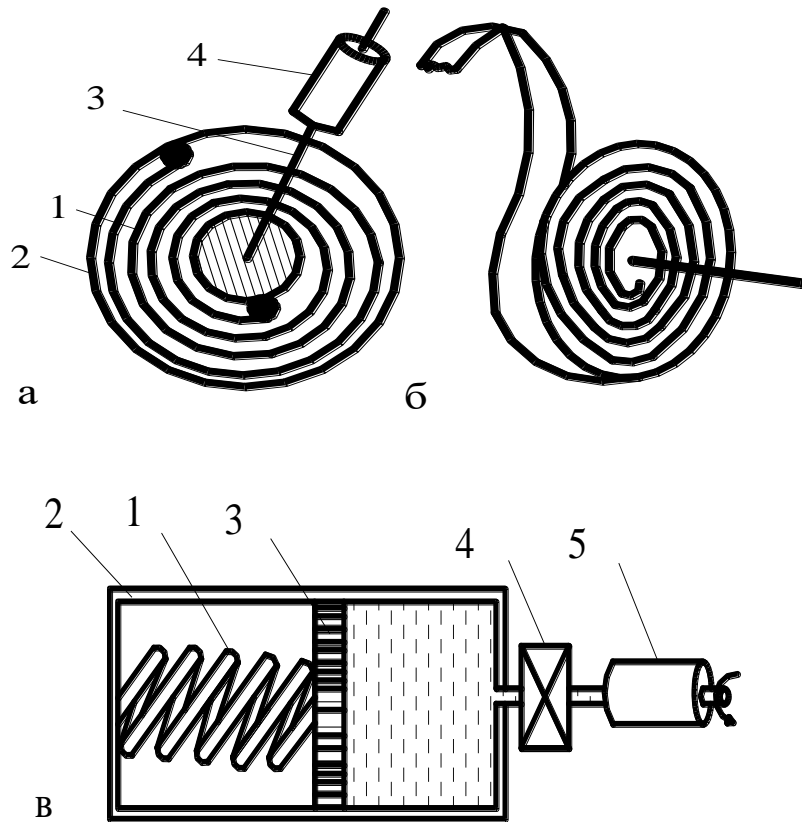


Рисунок 10.1 – Пружинні накопичувачі: а - схема накопичувача зі спіральною пружиною (1 - пружина, 2 – корпус, 3 - вал, 4 - редуктор); б - пружина S-подібної форми; в - поєднане компонування пружинного накопичувача і гідравлічного пристрою (1 - гвинтова пружина, 2 - корпус, 3 - поршень, 4 - вентиль, 5 - гідромашина)

Якщо зробити порівняльне оцінювання питомої енергії пружних елементів двох видів: сталевій пружини і технічної гуми, то збережена енергія в сталевій пружині становитиме

$$E = 2,1 \times 10^{11} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}; \gamma = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; W_{\text{пнт}} \approx 200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, \quad (10.5)$$

а в гумовій – $W_{\text{пнт}} \approx 350 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Через гістерезисний характер залежності $F = F(x)$ у циклі «заряд-розряд» виникають втрати і нагрів, які призводять до поступового старіння (руйнування) гуми, нестабільності та погіршення її пружних властивостей. Чи не для всіх випадків мають місце великі значення питомих показників, і «гумоаккумулятор» не завжди вдається спроектувати компактним. Залежно від допустимих напружень при проектуванні пружних елементів визначають їх геометричні розміри.

Газоаккумулявальні системи. Окремою групою можна виділити газоаккумулявальні МН. Принципову схему пристрою газобалонного МН

показано на рисунку 10.2. Великомасштабні установки запасують у стиснутому газі велику енергію:

$$W = \int_{P_1}^{P_2} V dP = V(P_2 - P_1), \quad (10.5)$$

$$W_{\text{пит}} = \frac{W}{M} = \frac{V(P_2 - P_1)}{M} = \frac{\Delta P}{\gamma}. \quad (10.6)$$

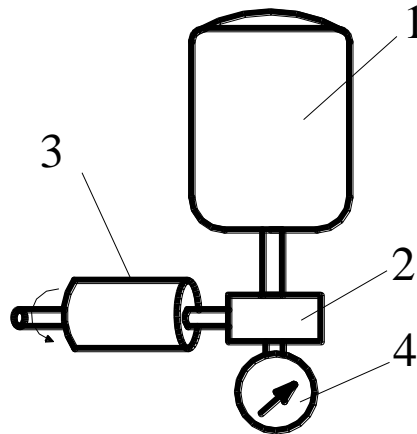


Рисунок 10.2 – Принципова схема пристрою з газобалонним накопичувачем: 1 - балон зі стисненим газом; 2 – вентиль; 3 – пневмодвигун; 4 – манометр

Наприклад, якщо $\Delta P = 250 \cdot 10^5$ Па (початковий тиск $p_1 = 10^5$ Па), то $W = 25 \cdot 10^5$ Дж незалежно від хімічного складу газу дорівнює:

$$W_{\text{пит}} = \frac{Ry \cdot T}{\mu}; \quad \mu = \frac{M}{\text{мм}}; \quad (10.7)$$

$Ry = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$ – універсальна газова постійна при $T \approx 273\text{К}$; $p \approx 10^5$ Па; μ - кількість кіломолей у газі масой M .

При поєднаних газобалонних накопичувачах з гідравлічним пристроєм, що виконують роль трансмісії, підвищується ККД цих установок. Це сприяє збільшенню ефективності використання. Таким чином, видно, що найбільш ефективним є застосування у МН легких газів.

Для самого легкого газу – водню ($\mu = 2$ кг / кмоль) при $T = 300$ К питома енергія $W_{\text{питH}_2} = 1250 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ (або 1250 Дж / г).

У рівнянні (10.2) тиск в явному вигляді не входить, так як $W_{\text{пит}}$ визначається за $\Delta P = P_2 - P_1$ відношенням надлишкового тиску газу до його густини. Остання при підвищенні тиску і $T = \text{const}$ зростає за лінійним законом (в ізотермічному процесі $pV = \text{const}$). Негативним фактором для застосування розглянутих МН є істотна маса газових балонів, так як високі показники тиску зумовлюють це з міркувань міцності.

Відмітна риса газобалонних МН - можливість тривалого зберігання енергії [3].

Гравітаційні накопичувачі. До групи статичних гравітаційних накопичувачів відносяться гідроакумулювальні механічні накопичувачі (рисунок 10.3). Нерівномірність споживання електроенергії в енергосистемах зумовлює поділ електричних станцій (ЕС) на базові та маневренні. Перші працюють завжди у розрахунковому номінальному режимі, який економічно найбільш вигідний. Маневренні ЕС у нічні години мають навантаження близько 50 % номінальної, що знижує ККД цих ЕС. Тому раціонально використовувати більшість ЕС як базові, направляючи надлишок електроенергії (під час провалів споживання) для заряду гідроакумулювальної установки (ГАУ) на гідравлічній акумулювальній й ЕС.

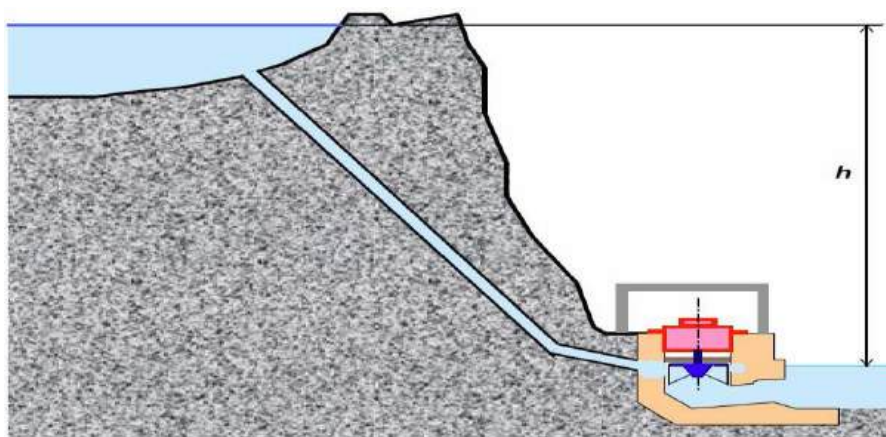


Рисунок 10.3 – Принцип пристрою гідроакумулювальної електростанції

Час запуску ГАУ і зміни режимів вимірюються лише кількома хвилинами. Накопичувальні басейни ГАУ споруджують на височинах. В окремих районах доцільно будувати ГАУ з підземними водяними резервуарами.

На рівні моря для рівномірного переміщення тіла масою $M = 1\text{ кг}$ з земної поверхні в космічний простір (тобто здійснюючи роботу) гравітаційна енергія тяжіння Землі має досить високий показник:

$W_{\text{пит}} = 61,6 \text{ МДж / кг}$ (для порівняння зазначимо, що це значення $W_{\text{пит}}$ приблизно у 1,4 рази більше хімічної енергії 1 кг гасу). При підйомі вантажу масою M на висоту $h = x_2 - x_1$ запасена потенційна енергія [3].

Гравітаційна енергія тяжіння Землі має значний потенціал:

$W_{\text{пит Н}_2} = 61,6 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ – питома енергія при падінні метеоритів;

$$W = \int_{x_1}^{x_2} g \cdot M dx = g \cdot M \cdot h, \quad (10.8)$$

де $M = \text{const}$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Згідно з (10.8) питома енергія $W_{\text{пит}} = W / M = gh$ залежить тільки від висоти h . Збережена енергія вивільняється при падінні вантажу і здійсненні відповідної корисної роботи в результаті переходу потенційної енергії в кінетичну.

Безпосереднє використання гравістатичних сил, створюваних природними масами, практично неможливо. Однак, перекачуючи воду в підняті штучні водосховища або з підземних водоймищ на поверхню, можна накопичити достатньо велику кількість потенційної енергії для великомасштабних застосувань в електроенергетичних системах. Якщо різниця рівнів $h = 200 \text{ м}$, у розрахунку на масу води $M = 10^3 \text{ кг}$ накопичена енергія на основі (10.8) $W = 1962 \text{ кДж}$; питома енергія $W_{\text{пит}} = \frac{W}{M} = 1,962 \text{ кДж/кг}$.

11 ДИНАМІЧНІ НАКОПИЧУВАЧІ. СТРУКТУРНІ СХЕМИ

Динамічні накопичувачі енергії інерційного типу мають найбільшу питому енергію порівняно з електрохімічними накопичувачами. Основним елементом інерційного накопичувача є обертовий маховик:

$$M_{\text{ЗМ}} = I \frac{d\Omega}{dt}, \quad (11.1)$$

де $M_{\text{ЗМ}}$ – рухомий зовнішній момент маховика;

M_{Γ} – гальмувальний момент;

$I \frac{d\Omega}{dt} = M_{\delta}$ – динамічний момент;

$$M_{\Gamma} = M_{\text{ТА}} + M_{\text{ТП}}, \quad (11.2)$$

де $M_{\text{ТА}}$ – момент аеродинамічного тертя; $M_{\text{ТП}}$ – момент тертя підшипників.

Баланс енергії в динамічному маховику:

$$I \frac{\Omega_1^2 - \Omega_2^2}{2} - \int_{t_1}^{t_2} \Omega M_{\text{ТА}} dt - \int_{t_1}^{t_2} \Omega M_{\text{ТП}} dt = \int_{t_1}^{t_2} \Omega M_{\text{ЗМ}} dt, \quad (11.3)$$

де Ω_1, Ω_2 – початкові та кінцеві умови швидкості обертання маховика, що відповідають часу t_1, t_2 ;

$W_{\text{К}} = 0.5I(\Omega_1^2 - \Omega_2^2)$ – кінетична енергія маховика;

$W = \int_{t_1}^{t_2} \Omega M_{\text{ЗМ}} dt$ – відведена енергія маховика.

Рекуперація (від лат. recuperatio - «зворотне отримання») - повернення частини матеріалів або енергії для повторного використання в тому ж технологічному процесі.

Конструктивне рішення маховиків

При розробленні маховиків прагнуть до того, щоб збільшити енергію, якою слід запасатись. Конструкції маховиків обмежені міцнісними можливостями матеріалу. Тому маховики розподіляють на *металеві*, *багатошарові* або *супермаховики* (рисунок 11.1).

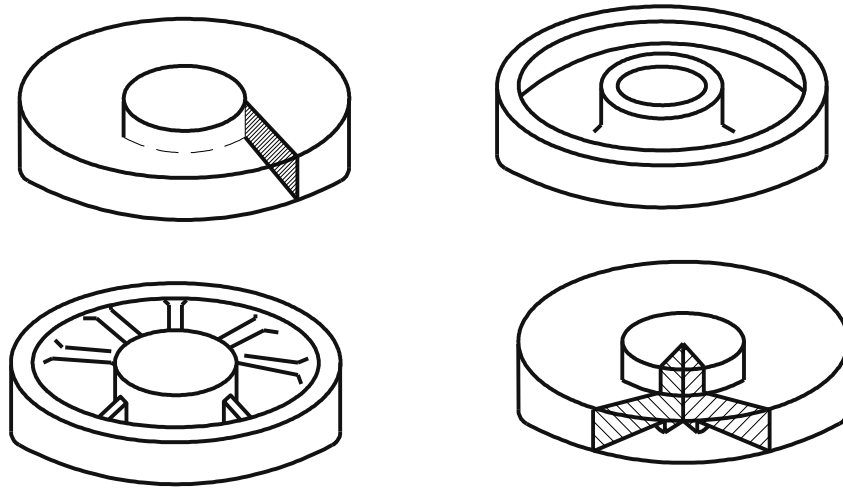


Рисунок 11.1 – Загальні схеми маховиків

Для металевих накопичувачів характерне відношення

$$W_{num} = \frac{\chi \sigma_p}{\gamma},$$

де γ, σ_p – параметри металу;

χ – коефіцієнт форми.

До металевих маховиків відносять диски різних форм:

1. Диск циліндричний постійної товщини з малим отвором, $\chi = 0.3$.
2. Тонкий обід зі спицями, $\chi = 0.5$.
3. Диск з ободом, $0.3 < \chi < 0.5$.
4. Диск постійної товщини без отвору, $\chi = 0.6$.
5. Конічний диск, $\chi = 0.8$.
6. Гіперболічний диск, $\chi = 0.8$.
7. Диск однакової міцності з квадратично експоненціальним профілем, $\chi \rightarrow 1$.
8. Стрижень опорної міцності.

Найбільші маси металевих маховиків знаходяться в межах 250 т. Частота обертання – 3000 об / хв, $d_{max} = 2m$.

Матеріали: леговані сталі, титанові сплави типу ВТ, алюмінієві сплави типу В95, магнієві сплави типу МА.

Багатошарові маховики

Дослідження щодо збільшення питомої енергії маховиків привели до створення конструкції маховиків на основі металевих дротів, металевих стрічок і КМ.

Існує три основні групи супермаховиків:

- обідкові;
- стрижневі;
- дискові (квазіізотропні);
- стрічкові.

На рисунках 11.2 – 11.6 зображено різні за конструктивними показниками маховики.

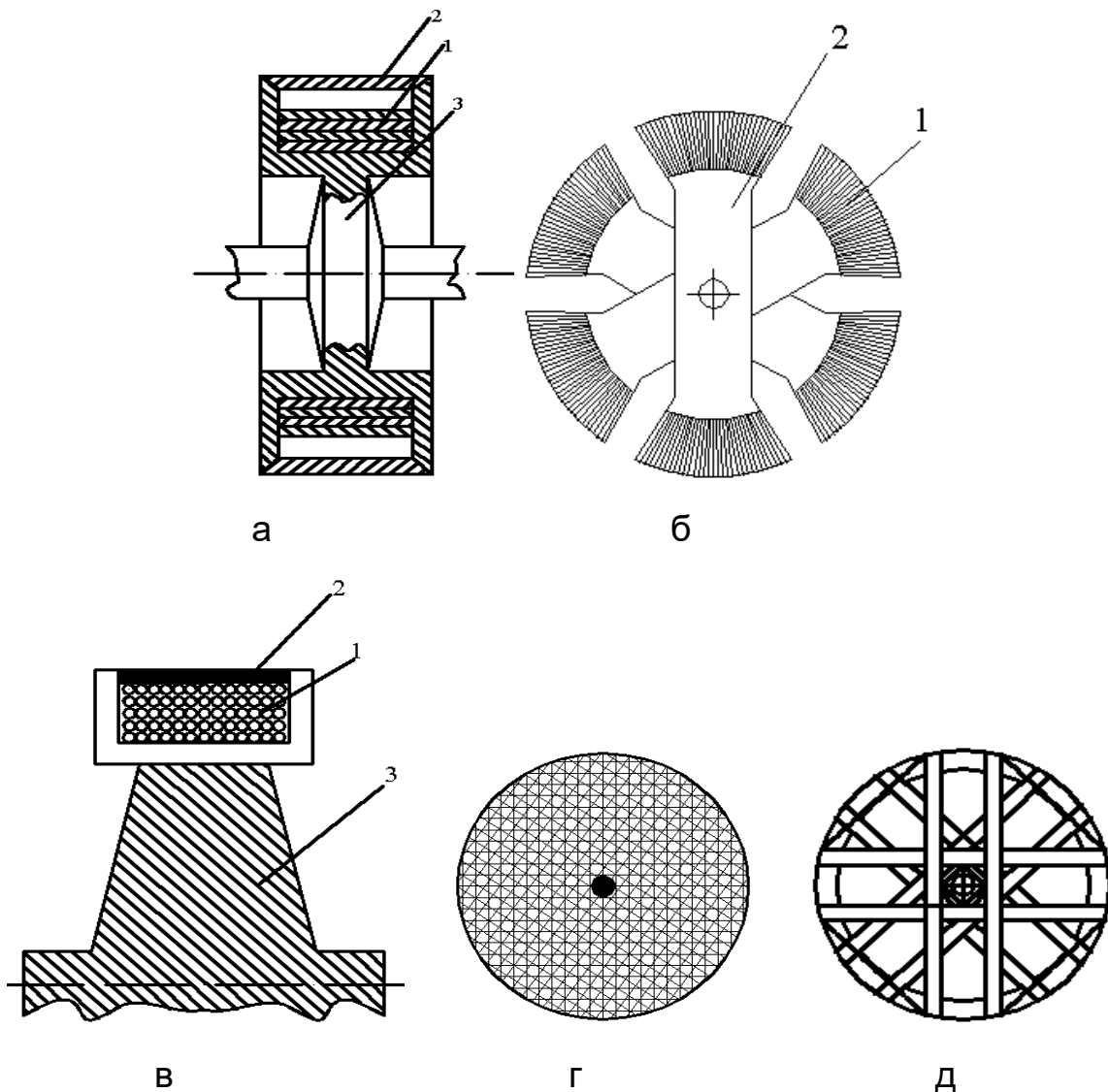


Рисунок 11.2 – Конструктивні типи основних різновидів маховиків:
а – стрічковий: 1 - металева стрічка, 2 - кожух, 3 - легкий диск;
б - стрижневий: 1 - волоконні стрижні, 2 - обойма; в – обідковий:
1 - волоконний обід, 2 - бандаж, 3 - легкий диск; г – дисковий
(квазіізотропна композитна конструкція з волокон); д – обідково-
дисковий: 1 - волоконний обід, 2 - стрічкові спиці

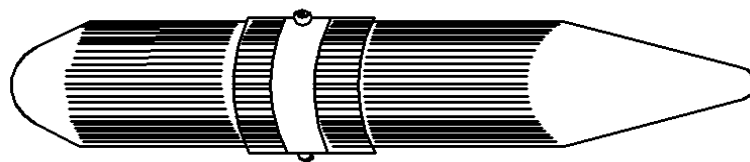


Рисунок 11.3 – Маховик стрижневого типу

Максимальна питома енергія, яка розвивається маховиками з композиційних матеріалів, дорівнює від 500 ... 4000 кДж / кг.

Типи волокон, що застосовуються:

- графіто-волокно;
- органо-волокно;
- скловолокно;
- бороволокно;
- сталевий дріт;
- сталеві стрічка типу ОТ.

Комбіновані волокна аналогічні стрічковим і дисковим.

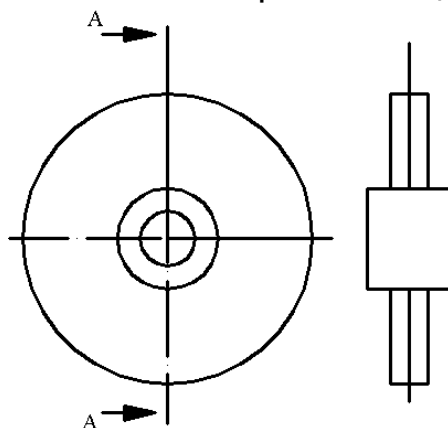


Рисунок 11.4 – Квазіізотропний диск

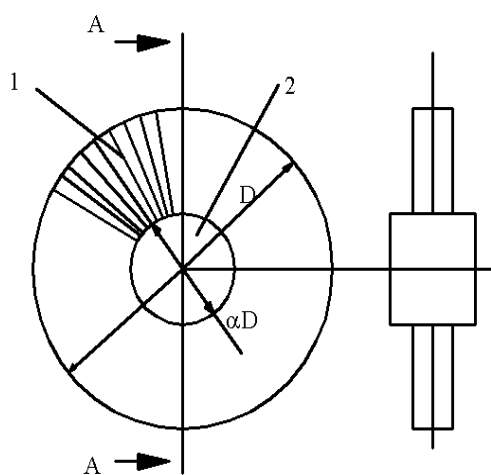


Рисунок 11.5 – Щітковий маховик

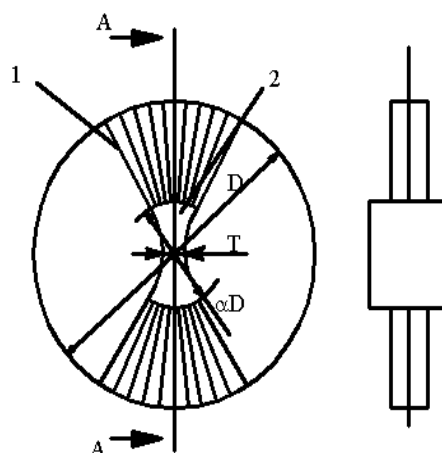


Рисунок 11.6 – Радіально-віяловий маховик

Втрати на тертя і їх компенсації

Для компенсації втрат на тертя в маховиках використовують методи зниження динамічного опору:

1. Вибірче перенесення (ВП). ВП виникає за наявності синтетичного мастила в тертьовій парі, в якій відбувається зсувна деформація металу і утворення пластичної плівки металу.

2. Підшипники аномально низького тертя, в якому здійснюється опромінення підшипника α чи β частками у вакуумі.

3. Газові підшипники.

4. Магнітні підвіси.

Основи розрахунку на міцність МН

Тонкий обід:

$$F_y = \frac{F_y}{\pi D},$$

$$F_{p1} = F_{p2} = F_p,$$

$$F'_c = 0.5F_c,$$

$$F'_c = 2F_p,$$

$$F'_c = M' r_y \Omega^2,$$

$$M' = 0.5M = 0.5\pi D\gamma S,$$

γ – щільність кільця;

S – поперечний перетин;

$$\sigma_p = \frac{F_p}{S} = \frac{0.5F_c}{S} = 0.25\gamma(\Omega D)^2,$$

$$v = 0.5\Omega D,$$

$$v = \sqrt{\frac{\sigma_p}{\gamma}}.$$

12 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ НАКОПИЧУВАЧІ

Електромеханічними накопичувачами називаються пристрої для запасання і зберігання механічної енергії з подальшим її перетворенням і віддачею у формі електричної енергії для подальшого використання.

В електромеханічних накопичувачах запасається кінетична енергія руху маховика. При заряді електромеханічний накопичувач розкручується

за допомогою механічних або електричних приводів (пружини, газотурбіни, пороховий заряд, електродвигун).

Варіантом електромеханічного накопичувача може бути ротор електромеханічної машини.

12.1 Класифікаційні ознаки

Залежно від виду і призначення до складу електромеханічних накопичувачів можуть входити різні електричні машини. У цьому випадку виділяють два типи ЕМН:

- на основі машин постійного струму (колекторні, вентильні та уніполярні);
- машини змінного струму (синхронні та асинхронні).

За розрядними характеристиками ЕМН поділяють на два різновиди:

1) тривалий режим від 1 с до 10 с - відбувається динамічне гальмування ротора електромагнітними силами електричної машини в робочій зоні оборотів машини;

2) короткочасний режим від 1 до 10 мс, такий режим пікового або ударного гальмування супроводжується аналогічними процесами реакції якоря. У процесі гальмування маховика система віддає кінетичну енергію і визначається різницею оборотів:

$$\Delta W_k = \frac{25\gamma}{\Omega_1^2 - \Omega_2^2}.$$

Гранична тривалість розряду визначається рівнянням зменшення обертів маховика.

Загальна структурна схема ЕМН

Сучасні технічні рішення ЕМН основані на застосуванні оборотного електроенергоустаткування з електричними машинами оборотного типу. Розглянемо структурну схему енергетичного комплексу з ЕМН (рисунок 12.1).

На рисунку 12.1 зображено структурну схему енергокомплексу з електромеханічним накопичувачем, яка складається з джерела живлення (ДЖ); перемикача режимів (ПР) «заряд-розряд»; комутатора (К), який в ЕМН з електричною машиною (ЕМ) постійного струму є оборотної дії; ЕМ класичної конструкції, що являє собою електромеханічний щітково-колекторний вузол, а в безконтактних вентильних ЕМ - керований напівпровідниковий перетворювач; маховика (М); споживача електроенергії (СЕЕ); блока стабілізації частоти (БСЧ) який застосовується, якщо ЕМ використовується в якості двигуна або генератора змінного струму і блок К тоді відсутній (штрихова лінія зв'язку); системи управління (СУ). Перемикач режиму (ПР) служить для перемикачання рекуперації енергії.

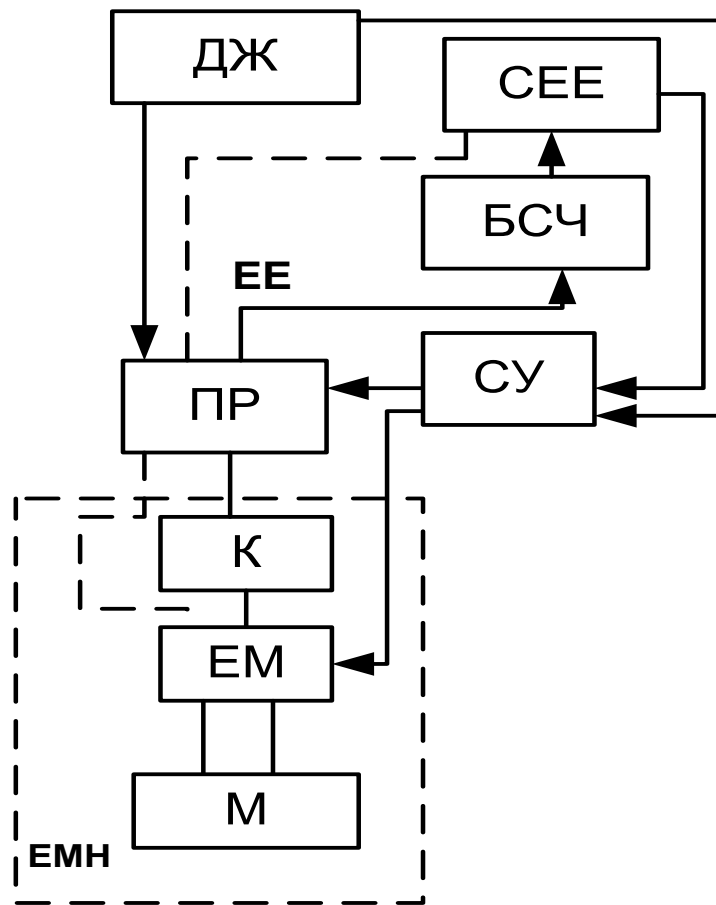


Рисунок 12.1 – Структурна схема енергокомплексу з електромеханічним накопичувачем

Виконавчим елементом перемикач режимів є комутатор.

Для колекторних машин - колектор (комутатор).

Для машин вентильних комутатор – це інертна система перетворення енергії.

Якщо в системі використовується машина змінного струму, то комутатор виключається зі схеми, а зв'язки замикаються через блок стабілізації частоти і перемикач режиму.

Конкретні установки з ЕМН можуть містити деякі додаткові елементи, наприклад пускові пристрої електродвигунів, блоки для стабілізації і регулювання частоти і напруги генераторів і ін. В цілому вибір структури ЕМН і типу ЕМН визначається технічними вимогами, що пред'являються до установки щодо номінальних параметрів, швидкодії, показників якості електроенергії, особливостей зарядно-розрядних режимів, масогабаритних обмежень, ресурсу, апаратурної надійності і т. д.

На рисунку 12.2 зображено схему електромеханічного накопичувача на прикладі ЕМН – виробник фірма VYCON.



Рисунок 12.2 – Електромеханічний накопичувач енергії VYCON

Згідно з дослідженнями, наведеними в зарубіжних публікаціях, сучасні електромеханічні накопичувачі енергії мають суттєву перевагу над іншими видами систем акумулювання в ефективності відновлення енергії (кВт·год на розряд по відношенню кВт·год на заряд). ККД в них перевищує 95 %, що значно краще, ніж будь-яка свинцево-кислотна батарея. Питома величина збереженої енергії при цьому може досягати 5...10 кВт, що в кілька десятків разів вище, ніж у електрохімічних батарей.

Основні властивості електричних машин, що входять до ЕМН

До електричних машин, що входять у склад електромеханічних накопичувачів відносять:

- електричні машини постійного струму;
- колекторні машини.

Їх переваги: простота, гнучкість регулювання обертового моменту двигуном або напругою генератора, простота оборотності машин, а *недоліки:* мала потужність при частоті обертання до 3000 об / хв, обмеження по струму, що знімається з колектора;

- вентильні машини. *Їх переваги:* низька питома маса, висока надійність, а *недоліки:* великі габарити перетворювальних пристроїв працюють у випрямному та інверторному режимах;

- уніполярні машини. Її *переваги:* відсутність якірних обмоток, малий внутрішній опір, низька індуктивність, а *недоліки:* низька напруга якоря, неможливість безконтактного виконання;

- машини змінного струму. Їх *переваги:* можливість безконтактного виконання, високий ресурс, простота обслуговування, а *недоліки:* великий індуктивний опір, при відсутності перемикача затруднено регулювання.

13 ОСНОВНІ РОЗРАХУНКОВІ СПІВВІДНОШЕННЯ ТА СХЕМИ КОМПОНОВКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Визначення енергії, необхідної для заряду ЕМН, ведеться за формулою

$$W_3 = \int_0^{t_3} P(t)dt + \xi \int_0^{t_3} P_e(t)dt = W_{\kappa} + W_{\text{тер}} + W_{\text{ел}} + W_{\text{магн}} + \xi W_6 ,$$

де W_3 – зарядна енергія;

$P(t)uP_e(t)$ – розрахункові значення потужності, споживані накопичувачем на заряді і системою збудження накопичувача;

$\xi = 0$ – якщо застосовується електричний привід без обмотки збудження,

$\xi = 1$ – якщо з обмоткою,

$W_{\text{тер}}$ – енергія тертя,

W_{κ} – кінетична енергія маховика,

$W_{\text{ел}}$ – енергія втрат в електричній частині якірної обмотки контактів підвідних дротів у напівпровідникових системах;

$W_{\text{магн}}$ – енергія магнітних втрат на гістерезис і вихрові струми;

W_6 – енергія, витрачена на збудження обмотки;

t_3 – час заряду.

1-й випадок

Підведення до ЕМН змінного струму за формулою

$$P(t) = mU_{\phi}(t) + I_{\phi}(t) \cos \varphi(t) ,$$

де m – кількість фаз,

φ – зсув фаз.

2-й випадок

Використовується машина постійного струму:

$$P(t) = U(t)i(t) \quad m=1 \quad \varphi=0 .$$

Потужність, витрачена на збудження:

$$P_e(t) = U_e(t)i_e(t) .$$

Розряд ЕМН

Можливі випадки:

1) повний магнітний потік збудження;

2) форсований магнітний потік.

При цьому можливе або динамічне гальмування, або ударна рекуперація. Електрична машина в цих випадках працює як генератор.

При цьому енергія, яка може бути вироблена електричною машиною, подана як залежність

$$W_e = \int_0^{t_p} P_H(t) dt .$$

1. Багатофазний генератор змінного струму працює відповідно формулі

$$P_H(t) = m I_{\phi}^2(t) R_H ,$$

де I_{ϕ} – діюче значення струму фазного навантаження.

2. Машина постійного струму

$$P_H(t) = i^2(t) R_H .$$

Найчастіше використовують роботу постійного струму як індуктивно-резистивне навантаження для зниження пульсації енергії силового кола.

У цьому випадку сигнал з машини постійного струму може бути оформлений як гармонійний:

$$i = -I_m \sin \omega_0 t ,$$

де ω_0 – основна частота, згідно з якою відбувається перетворення в цій машині;

$$I_m = \Omega_1 \sqrt{\frac{\gamma}{l}} = \sqrt{\frac{2W_k}{l}} ,$$

де Ω – початкова кутова швидкість.

l – індуктивність;

E – ЕРС системи;

$$\omega_0 = \frac{E}{\Omega_1 \sqrt{\gamma l}} = \frac{E}{\sqrt{\frac{2W_k}{l}}} ,$$

де l – компенсує провали.

$$E = E(\Omega) = const$$

Енергії, яка запасється в індуктивному навантаженні, відповідає

$$W_L = \frac{L_H I_m^2}{2} = L_H I^2 ;$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{W_k}{L}} ,$$

де W_k – кінетична енергія;

I – діюче значення струму.

У разі, якщо розряд відбувається на постійній напрузі, тобто регулюється обмотка збудження, то

$$\begin{matrix} U = const \\ \Omega = var \end{matrix} \Rightarrow U = L \frac{di}{dt} .$$

Тоді енергія в індуктивності дорівнює

$$W_L = \int_0^t U_0 i(t) dt = \frac{1}{2} Li^2(t_p).$$

При підключенні до ЕМН елементів фільтру на основі індуктивності або ємності процес розряду стає коливальним, що призводить до періодичних змін оборотів маховика.

Регулювання розряду ЕМН

Для отримання стабільної частоти вихідної напруги застосовуються методи регулювання, які можуть бути:

1. Перетворювачі з ланкою постійного струму.
2. Інвертори, які дозволяють безпосередньо перетворювати змінну частоту обертання маховика в постійну частоту генератора, при $f_{var} > f_{const}$ - умові роботи циклу інвертора.

Регулювання напруги можливе у двох випадках:

- з регулюванням;
- без регулювання.

1. Ударний режим.

В ударному режимі регулювання розрядних параметрів обмежено високою швидкістю і застосовується тільки в крайніх випадках.

2. Динамічне гальмування:

- варіювання струму навантаження шляхом змінення струму збудження;
- регулювання змінення кута запалювання керуючих тиристорів випрямляча;
- комбінований метод.

Аналіз питомих показників ЕМН

Питома енергія електромеханічних накопичувачів розраховується за формулою

$$W_{EMH} = \eta_p \cdot (W_{k_1} - W_{k_2}) = 0.5 \cdot \eta_p \cdot I_m \cdot \Omega_1^2 (1 - \Omega_{2*}^2),$$

де W_{k_1}, W_{k_2} – початкова і кінцева кінетичні енергії;

η_p – ККД розряду;

I_m – момент інерції маховика;

$$I_m = 0.5 \cdot M_m \cdot R_m^2;$$

Ω_1 – початкова швидкість;

Ω_{2*} – відносна кутова швидкість в кінці розряду;

$$\Omega_{2*} = \frac{\Omega_2}{\Omega_1};$$

M_m – маса маховика;

$$M_m = \frac{4 \cdot W_e}{\eta_p \cdot R_m^2 \cdot \Omega_1 \cdot (1 - \Omega_{2*}^2)}$$

Особливістю ЕМН є здатність накопичувати енергію в магнітному зазорі.

Для аналізу енергії вводиться коефіцієнт використання активного обсягу якоря

$$\sigma_u = \frac{P_p}{D^2 \cdot \ln} = \frac{2 \cdot \pi \cdot M_p}{D^2 \cdot l} = \frac{\pi \cdot F_p}{D \cdot l},$$

де P_p – потужність розряду;

M – момент, створюваний ротором;

F_p – тягове зусилля;

D – діаметр циліндричного ротора;

l – довжина;

n – число пар полюсів;

$$M_{EM} = \frac{0.5 \cdot \pi^2 \cdot k_m \cdot k_{D^2} \cdot k_l \cdot \gamma_{сеп} \cdot P_p}{\Omega_{2*} \cdot \Omega_1 \cdot \sigma_u},$$

де $k_m \cdot k_D \cdot k_l$ – коефіцієнти, що враховують масу конструктивних елементів;

$\gamma_{сеп}$ – середня щільність матеріалу ротора;

$$M_c = M_M + M_{EM} \Big|_{\min}.$$

Для дотримання цієї умови необхідно враховувати значення

$$\Omega_{2*} / P_p \uparrow, t_p \downarrow.$$

Питоме значення електромагнітної енергії

Розрізняють два значення:

$$W_{\delta,num} = \frac{W_\delta}{V_\gamma};$$

$$W_{\delta,num} = \frac{W_\delta}{M_\gamma}.$$

Коефіцієнт використання може бути поданий у вигляді

$$\sigma_u = \pi^2 \cdot k_\phi \cdot k_o \cdot \alpha_\delta \cdot H_\gamma \cdot B_\delta,$$

де B_δ – магнітна індукція [Тл];

H_γ – магнітно-струмове навантаження в якорі [А / м];

k_ϕ – коефіцієнт форми кривої в просторовому розподілі магнітного потоку в зазорі;

k_o – коефіцієнт форми обмоток машини;

α_δ – співвідношення між полюсним розподілом якоря і розрахунковою шириною магнітного полюса:

$$k_\phi \cdot k_o \cdot \alpha_\delta = (0.6 \dots 0.7),$$

$$\sigma_u = \left[\frac{\text{Тл} \cdot \text{А}}{\text{м}} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right] = \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right],$$

$$\sigma_u = \frac{\pi^2}{2} \cdot M_{py} = \pi^2 \cdot F_{py};$$

$$W_{\delta,num} = \frac{2}{\pi^2} \cdot \sigma_u = M_{py} = 2F_{py};$$

$$W_{\delta,num} = \frac{2}{\pi^2} \cdot \sigma_u = M_{py} = 2F_{py} \quad \gamma_{cep} = \frac{M_y}{V_y}.$$

Для сучасних машин:

$$B_\delta = 2.1Tл;$$

$$H_y = 5 \cdot 10^6 [A/м]$$

$$W_{\delta,num} = 1.5 \text{ кДж}/м^3;$$

$$W_{\delta,num} = 2 \text{ кДж}/кг.$$

Схеми компонування ЕМН

Розглянемо ЕМН на базі асинхронних машин. Завдяки простоті конструкції асинхронні ЕМ знайшли широке застосування як розгінні двигуни установок з ЕМН. Як ЕМН, що працюють в режимі зберігання запасеної при заряді кінетичної енергії, можна розглядати асинхронні гіродвигуни зверненої конструкції, що мають інтегральне виконання спільно з маховиком (рисунки 13.1, а). Подібні двигуни поширені на космічних літальних апаратах (ЛА) і служать одними з головних функціональних елементів систем гіронавігації і орієнтації. Ротор двигуна знаходиться зовні статора (рисунки 13.1, а). На нерухомій порожнистій вісі 1, всередині якої проходять висновки 2 трифазної обмотки 3, укріплений статор 4. Ротор 5 з короткозамкненою стрижневою обмоткою 6 забезпечений зовнішнім маховиком 7. Від джерела живлення підвищеної частоти понад 400 Гц до обмотки статора підводиться трифазна напруга, яка дорівнює 220/120 В. При чотириполюсному виконанні двигуна його ротор обертається в підшипниках 8, 9.

У бортових системах керування космічних літальних апаратів для створення моментів, які керують положенням корпусу апарата щодо центра мас, застосовуються ЕМН, виконані на базі асинхронних машин. Використання для цієї мети реактивних двигунів зі збільшенням тривалості функціонування літального апарата стає неекономічним, оскільки вимагає наявності на борту запасів робочого тіла зі складною системою його зберігання і розподілу. Застосування ЕМН дозволяє істотно зменшити загальну масу системи управління, що дає великий економічний ефект з урахуванням високої вартості виведення одиниці маси на космічну орбіту.

Як джерела керуючих моментів використовують ЕМН двох типів: двигуни-маховики, які створюють керуючі моменти за рахунок зміни кутової швидкості їх ротора, і силові гіроскопи (гіродіни), які обумовлюють керуючі моменти при зміні взаємного розташування їх роторів, що обертаються з постійною кутовою швидкістю. В обох випадках керування кутовим

становищем апарата здійснюється внаслідок перерозподілу сумарного кінетичного моменту між корпусом апарату і обертливими масами ЕМН. Галузь їх застосування обмежується автоматичними космічними ЛА і відносно легкими орбітальними станціями. Гіродіни більш доцільні для важких орбітальних станцій і більших космічних комплексів [3].

Розглянемо як приклад гіросилової стабілізатор-гіродін, розроблений для супутників зв'язку «Блискавка». Асинхронний двигун ЕМН має звернену конструкцію (рисунок 13.1, а) ротор з короткозамкненою обмоткою суміщений з маховиком, розташованим зовні статора і забезпечений двохосьовим карданним підвісом (див. рисунок 5.3, б). Гіродін надає всьому ЛА властивості гіроскопа, утримуючи поздовжню вісь корпусу в заданому напрямку. При управлінні рухом навколо цієї осі гіродін, з масою 87 кг, використовується як двигун-маховик.

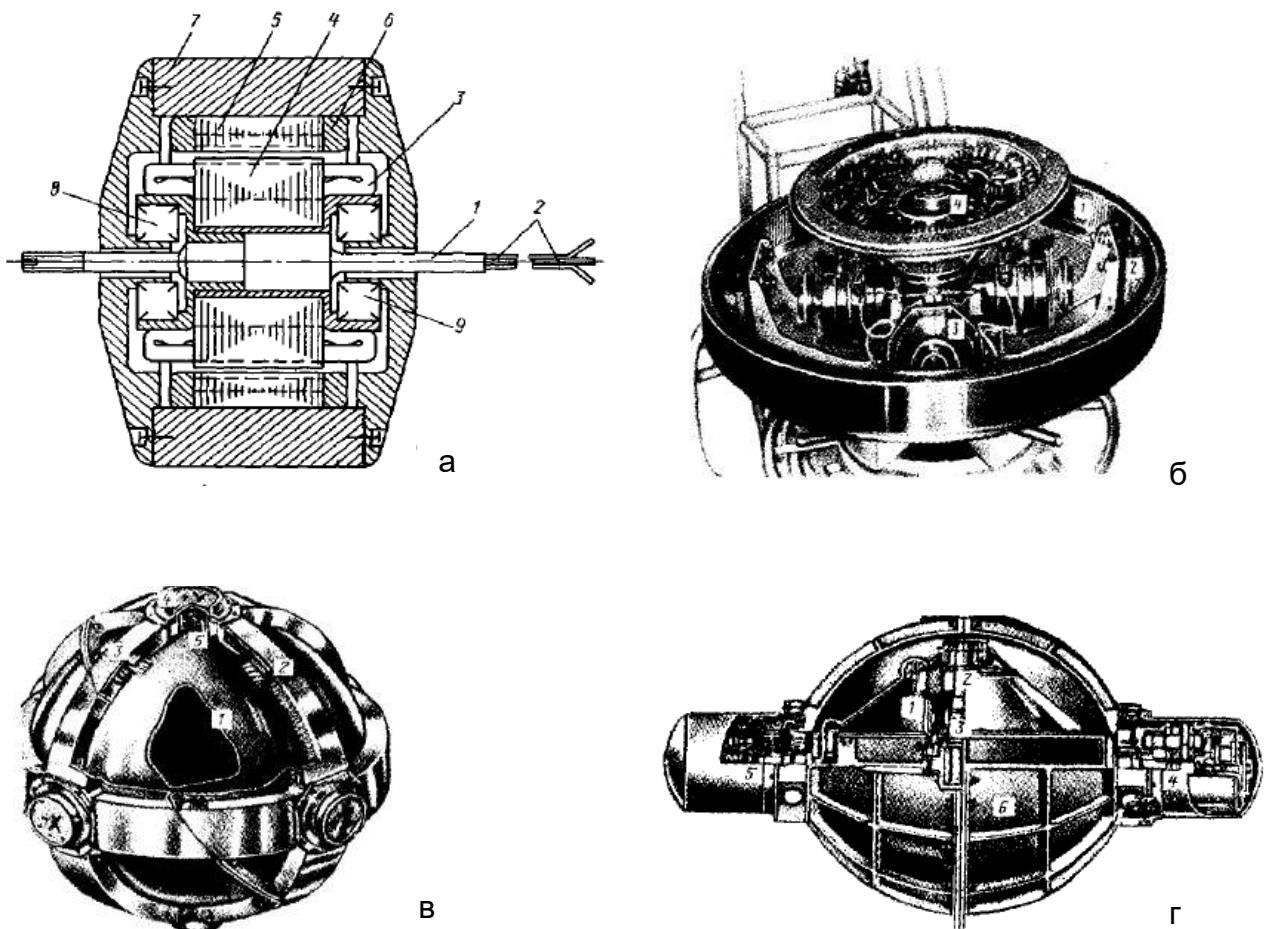


Рисунок 13.1 – ЕМН на базі асинхронних машин: а – конструктивна компоновка асинхронного гіродвигуна: 1 – ротор, 2 – дуговий статор, 3 – пружно-в'язкий амортизатор, 4 – шпindelь; б – гіросиловий стабілізатор; в – к ульовий двигун-маховик (1 – ротор, 2 – статорна дуга, 3 – тахогенератор, 4 – електромагніт; 5 – датчик положення); г – двоступеневий гіроскоп-гіродін: 1 – ротор, 2 – електромагнітний підшипник, 3 – електропривід ротора; 4 – привід прецесії, 5 – струмопідвід, 6 – корпус

Прикладом використання ЕМН на базі асинхронних двигунів-маховиків є система управління, розроблена для дослідницьких супутників серії «Космос» і метеоритологічних супутників «Метеор». Ця система забезпечувала початкове заспокоєння ЛА після його виведення і відділення від носія, а також орієнтацію і стабілізацію щодо орбітальної системи координат. Система включає в себе три двофазних двигуна з маховиками на валах, які орієнтовані в трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Система управління забезпечує орієнтацію по вертикалі з похибкою не більше 2° , по курсу - не більше $3,5^\circ$, споживає потужність 50 Вт (близько 10 % потужності системи електропостачання ЛА), має масу 200 кг (близько 15 % маси ЛА), її технічний ресурс становить 2 роки.

Новий напрямок у створенні ЕМН маховикових пристроїв управління було відкрито розробкою кульового двигуна-маховика з електромагнітним підвісом для використання в системі активної тривісної орієнтації і стабілізації для орбітальних станцій типу «Салют». Асинхронний кульової форми двигун (рисунок 13.1, в) має порожнистий сферичний ротор, який утримується всередині корпусу шістьма електромагнітами. Автоматичне центрування ротора досягається регулюванням струму в електромагнітах за сигналами шести індуктивних датчиків. Ротор обертається в магнітному полі шести дугових (секторних) статоров, розташованих на корпусі попарно в трьох взаємно перпендикулярних площинах. Частота обертання ротора по трьох осях вимірюється трьома індукційними тахометричними генераторами, дугові статори яких розташовані на корпусі аналогічно статора електродвигуна. На відміну від одноосьових маховиків в шаровому двигуні-маховику не виникають гіроскопічні моменти при просторовому обертанні корпусу ЛА. Це дає можливість виконати систему управління з підвищеною точністю.

Використання магнітного підвісу дозволило розробити високошвидкісний двоступеневий гіродін (рисунок 13.1, г), призначений для тривалого терміну служби.

Особливий інтерес викликає застосування електромеханічних накопичувачів для систем автономного електропостачання. Відомо, що загальною особливістю поновлюваних джерел енергії, таких як енергія вітру і сонця, є їх нестійкість за величиною і за часом. Так вітровий потік характеризується нестійкістю у напрямку і швидкості, що може привести, наприклад, до короткострокових коливань параметрів електричного струму. Те ж саме спостерігається і в сонячній енергетиці, яка пов'язана зі змінами дня і ночі, а також впливом погодних умов. Тому має сенс накопичити енергію в період її вироблення, і потім використовувати для безперервної її подачі споживачеві, коли виробіток не здійснюється. Особливо це актуально для систем автономного електропостачання, які дозволяють забезпечити споживачів електричним струмом там, де це ускладнено звичайним способом через загальну електричну мережу. На рисунку 13.2 подано схему такої системи автономного електропостачання.

Наведену схему системи автономного електропостачання розроблено компанією ENERCON (Німеччина), в якій як проміжні ланки встановлено дизель-генератор, акумуляторну батарею, а також механічний накопичувач енергії.

Принцип дії такої схеми полягає у подачі надлишкової електроенергії на електродвигун, який розкручує маховик. Маховик тим часом накопичує енергію. Після того, як споживач відновив здатність утилізувати одержувану електроенергію, генератор перетворює енергію обертання назад в електроенергію.

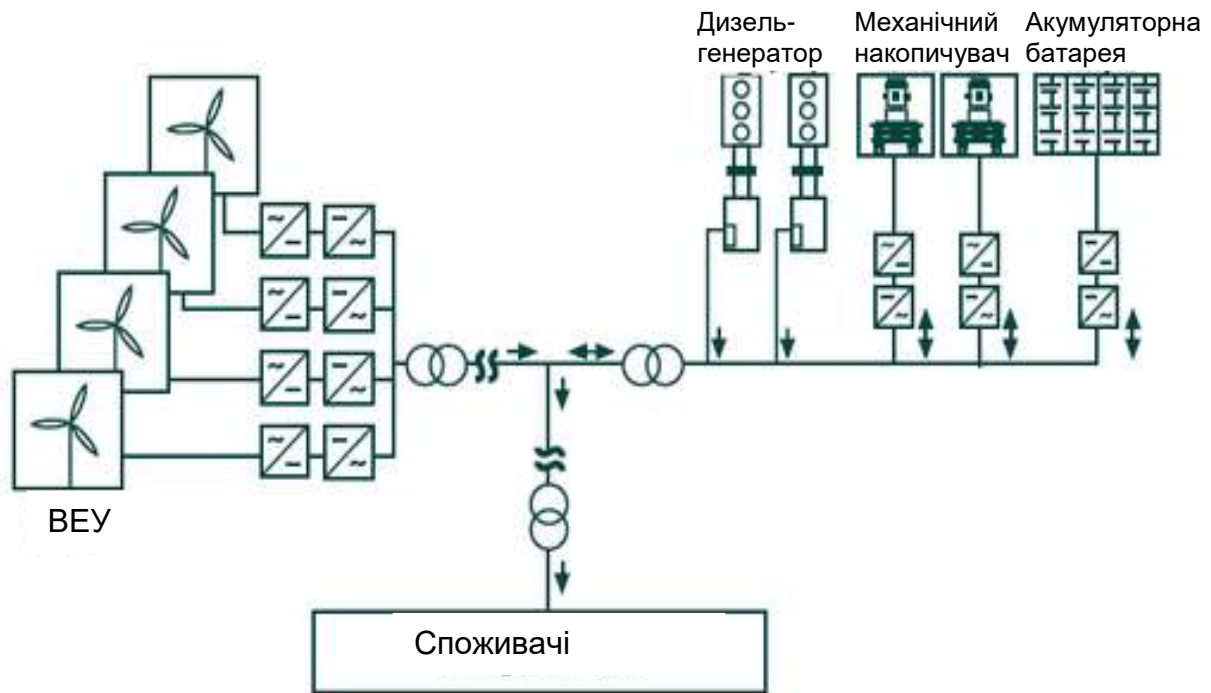


Рисунок 13.2 – Схема автономного електропостачання, ENERCON (Німеччина)

Якщо врахувати, що сучасні електродвигуни і генератори володіють високим ККД, а втрати при використанні сучасних технологій і матеріалів в конструкції накопичувача мінімальні, можна зробити висновок, що використання електродинамічного накопичувача в зв'язці «виробник-споживач» в автономних енергосистемах є перспективним рішенням.

14 ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ НАКОПИЧУВАЧІ

Електродинамічні накопичувачі (ЕДН) містять накопичувач кінетичної енергії і електромеханічний генератор, вони є різновидом ЕМН.

ЕДН поєднують у собі переваги механічних накопичувачів з високою щільністю енергії і електромеханічних накопичувачів з високим ККД.

Конструктивно ЕДН поєднують як одне ціле два вузла – механічні накопичувачі і електромеханічні накопичувачі.

14.1 Особливості електродинамічних накопичувачів, схеми і застосування

ЕДН об'єднують в собі різні типи генераторів – однофазних і багатофазних, дія яких основана на циклічному стисненні магнітного потоку, яке здійснюється рухливими відносно один до одного магнітними контурами.

Перетворення механічної енергії в електромагнітну відбувається з одночасним виділенням енергії у навантаженні.

Розрізняють два види ЕДН:

- лінійного руху (рисунок 14.1);
- обертального руху (рисунок 14.2).

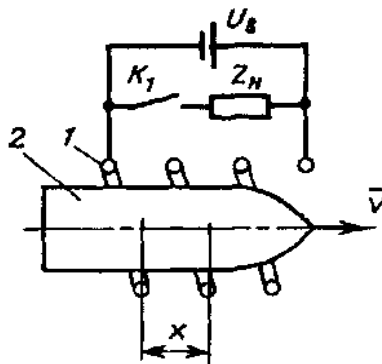


Рисунок 14.1 – Схема ЕДН лінійного руху ротора:
1 – статор; 2 – ротор

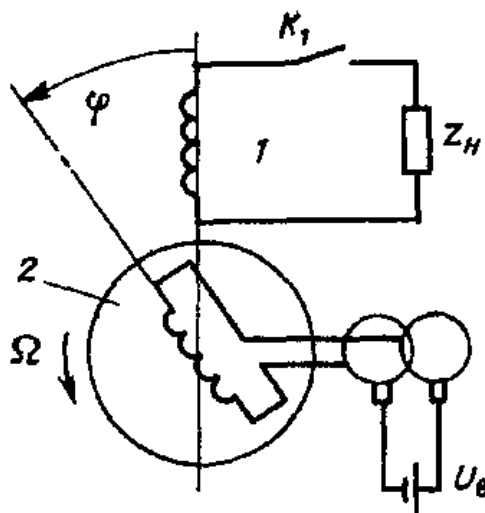


Рисунок 14.2 – Схема ЕДН обертального руху:
ЩКУ – щітково-колекторний вузол – джерело збудження

Використання традиційних джерел безперебійного живлення з великим об'ємом акумуляторних батарей і необхідністю резервування живлення дизель-генераторами (ДГ) створює супутні проблеми, які не дуже радують власників таких систем. Згадаймо головний біль споживачів з приводу забезпечення гарантованого живлення двигунів або холодильних установок. Є проблеми і з компенсацією реактивної потужності. А якщо врахувати простір, займаний традиційними системами гарантованого електропостачання (СГЕ) в цілому, а також необхідність підтримки клімату в приміщеннях з акумуляторними батареями і їх заміни після закінчення не настільки вже й великого терміну їх експлуатації, то стають зрозумілими причини пошуку альтернативних рішень.

Розглянемо динамічні (вони ж - дизель-роторні) джерела безперебійного живлення, пропонувані на світовому ринку різними виробниками (рисунок 14.3).

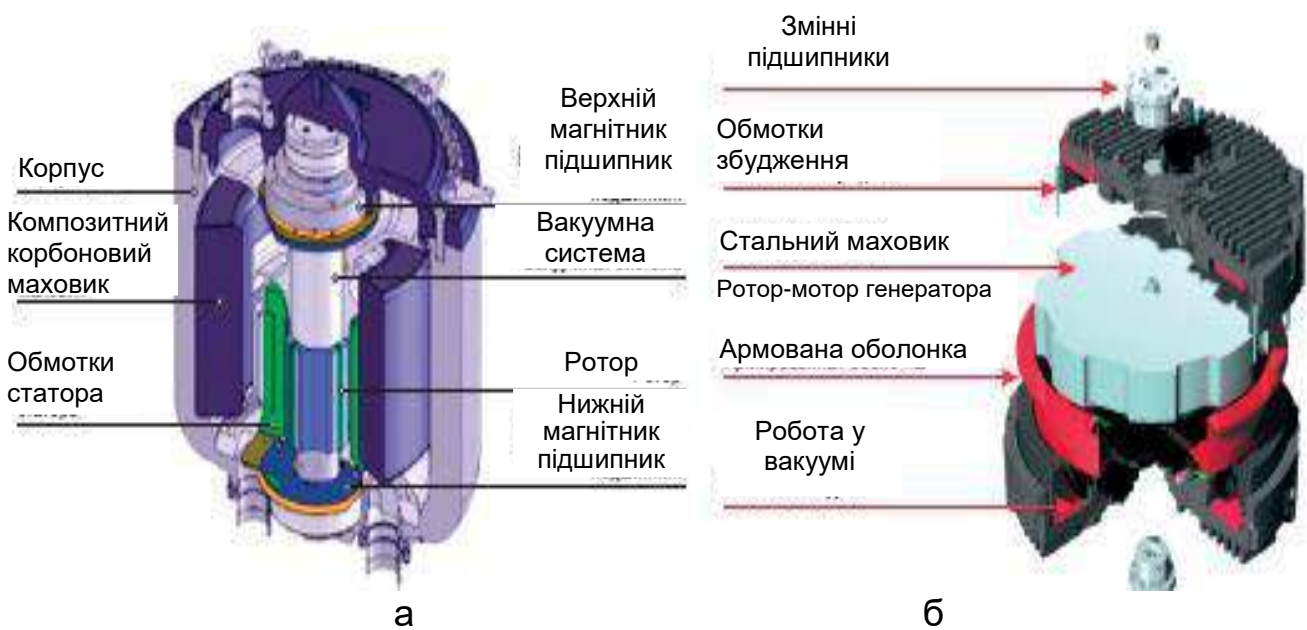


Рисунок 14.3 – Роторний накопичувач кінетичної енергії:
 а – виробник Socomes; б – виробник Active Power

Їх можна підключати до джерел безперебійного живлення замість традиційних акумуляторних батарей. А можна і паралельно - на додаток до АКБ, оскільки такі накопичувачі виробляються з повним набором необхідних перетворювачів. У результаті заміни ми отримуємо традиційне джерело безперебійного живлення з подвійним перетворенням енергії, або з «гібридним» або чисто роторним акумулятором резервної електричної енергії (рисунок 14.4).

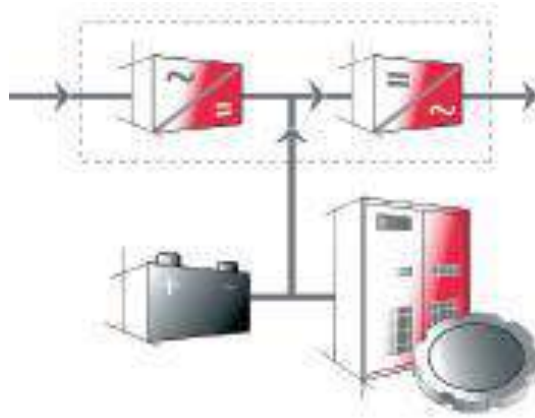


Рисунок 14.4 – Паралельне використання класичних АКБ і роторного акумулятора в статичному джерелі безперебійного живлення з подвійним перетворенням енергії

Кінетичні накопичувачі енергії знайшли застосування також і в чисто роторних ДБЖ, де відсутні елементи зі сфери традиційних статичних джерел, такі як випрямляч, інвертор, акумуляторні батареї та ін.

15 ЄМНІСНІ НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ

Ємнісні накопичувачі (ЄН) запасують енергію електричного поля. Режими роботи ЄН пояснюються функціональною схемою і циклограмами (рисунки 15.1 і 15.2). Джерело електроживлення (ДЖ) з автоматичним регулятором (АР) утворюють зарядний пристрій (ЗП) ємнісного накопичувача.

Джерело електроживлення може бути як постійного, так і змінного струму у вигляді електромашинних генераторів або статичних пристроїв. При замиканні комутатора зарядного кола К і розімкненому комутаторі розрядного пристрою РП від ДЖ заряджається батарея конденсаторів С_н, в якій за час зарядного процесу накопичується енергія:

$$W_H = 0,5u_{c_n}^2(t_3)C_n.$$

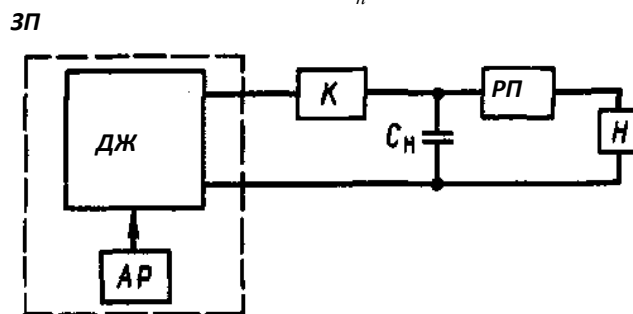


Рисунок 15.1 – Узагальнена функціональна схема ЄН

Від джерела живлення за час t_3 споживається середня потужність $P_{\text{сер},3} = W_{\text{н}t_3}^{-1}$. Розряд відбувається за час $t_p \ll t_3$ при замиканні РУ. При навантаженні N виділяється розрядна потужність

$$P_{\text{н}} = W_{\text{н}t_p}^{-1} \eta_{\text{рр}},$$

де $\eta_{\text{р}}$ - ККД розрядного контуру.

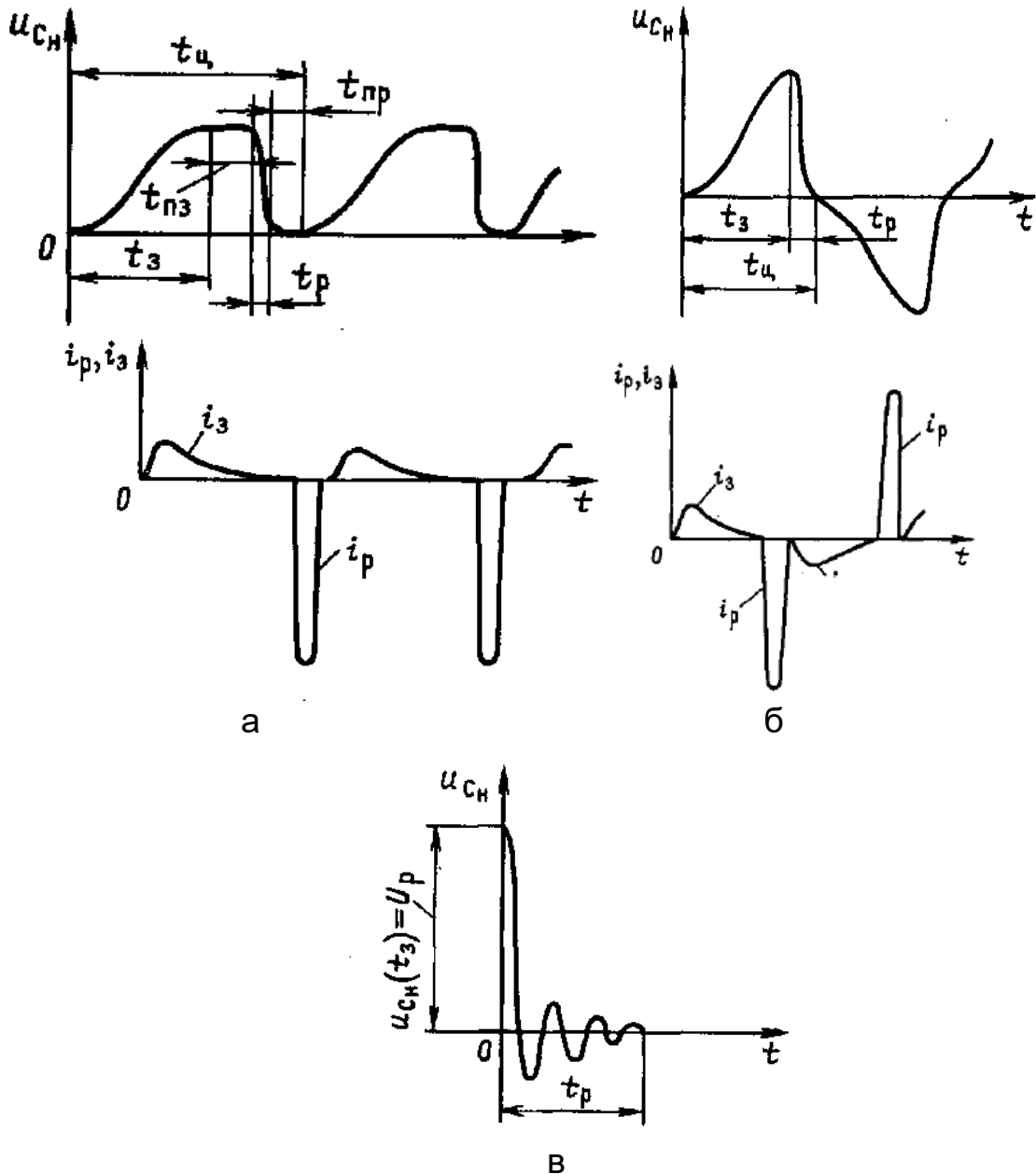


Рисунок 15.2 – Циклограми режимів роботи СН:
 а – зарядні і розрядні струми незмінного спрямування;
 б – знакоперемінні зарядні і розрядні струми;
 в – напруга в коливальному розряді

При $t_p \ll t_3$ на інтервалі часу розряду відбувається багатократне збільшення потужності по відношенню до середньої, споживаної від джерела живлення на інтервалі часу зарядного процесу t_3 .

Замикання РП може відбуватися як при розімкнутому, так і при замкнутому К.

На рисунку 15.2, а показано періодичний процес «заряд – розряд». Між зарядом і розрядом у загальному випадку існує післязарядна пауза $t_{пз}$, а після розряду перед повторенням наступного циклу - післярозрядна пауза $t_{пр}$.

Таким чином, період зарядно-розрядного циклу:

$$t_{ц} = t_{з} + t_{р} + t_{пз} + t_{пр}.$$

Найменшою з усіх складових тривалості циклу $t_{ц}$ є $t_{р}$. Це значення при розробленні ЄН прагнуть робити мінімальним за рахунок параметрів розрядного контуру і конденсаторів.

На рисунку 15.2, а показано зарядний і розрядний струми незмінного напрямку і напруга на ЄН незмінної полярності в циклічному режимі «заряд – розряд». Такий режим зазвичай має місце при використанні джерела живлення постійного струму.

Принципово конденсатор можна заряджати і змінним струмом, хоча такий спосіб заряду ЄН має обмежене практичне застосування. При заряді конденсатора змінним струмом напруга на конденсаторі і струми можуть бути як односпрямованими, подібно зображеним на рисунку 15.2, а, так і знакозмінними, як показано на рисунку 15.2, б, або напруга в коливальному розряді (рисунок 15.2, в).

Ефективність ЄН тим вище, чим більше C_n і напруга U_p перед розрядом. Тому конденсатори ЄН виконують високовольтними. Характерним режимом роботи конденсаторів ЄН є режим роботи при несинусоїдальних напругах і токах і при великих максимальних значеннях розрядного струму.

У ряді випадків зарядний процес ЄН є керованим. Керування процесом здійснюється за допомогою автоматичного регулятора АР, а цілі регулювання визначаються призначенням ЄН. Головним чином, регулювання застосовують для отримання максимального ККД зарядного процесу або рівномірного навантаження джерела живлення в процесі, зарядного циклу. Іноді керування використовується для здійснення періодичного режиму роботи «заряд–розряд» з мінливою частотою проходження розрядів.

15.1 Загальні відомості про фізичні процеси в конденсаторі

Найпростіший ідеалізований конденсатор складається з двох плоских металевих пластин, розташованих у вакуумі на відстані d паралельно один одному (рисунок 15.3, а). Кожна пластина (обкладка) має площу S . До пластин прикладено різницю потенціалів U .

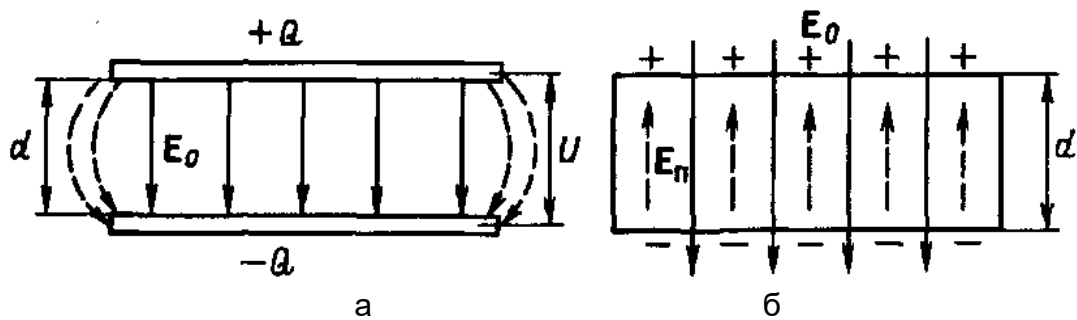


Рисунок 15.3 – Елементарний ідеалізований конденсатор:
а - вакуумний; б - з активною зоною з діелектрика

Відношення заряду пластин Q до різниці потенціалів U є постійна величина, яка називається електричною ємністю:

$$C = Q / U.$$

У реальних конденсаторах ϵ_n використовуються різного типу діелектрики, розташовані між пластинами.

Розглянемо коротко фізичні процеси в активній зоні конденсатора на спрощеній моделі поляризації діелектрика, вміщеного між пластинами. При внесенні діелектрика в зовнішнє електричне поле E_0 , створене під дією різниці потенціалів U , пов'язані заряди діелектрика зміщуються. Цей процес називається *поляризацією*. Поляризація діелектрика протікає по-різному, в залежності від типу молекул діелектрика. Полярні діелектрики складаються, в основному, з диполів - поляризованих молекул, у яких електричні заряди $+q$ і $-q$ розташовані на відстані l один від одного. Диполь має електричний момент p , який являє собою вектор, спрямований від $-q$ до $+q$ по осі диполя і чисельно дорівнює ql . При відсутності зовнішнього поля всі молекулярні диполі розташовані хаотично, і сумарний електричний момент діелектрика дорівнює нулю.

При поляризації діелектрика пов'язані заряди на його зовнішніх поверхнях, перпендикулярних до ліній зовнішнього поля E_0 , створюють поле поляризації E_n , спрямоване проти зовнішнього поля (рисунок 15.3, б).

У деяких діелектриках при відсутності зовнішнього електричного поля молекули електрично нейтральні, тобто в них центри позитивних і негативних зарядів збігаються. Поляризація молекул неполярних діелектриків полягає в тому, що під дією зовнішнього електричного поля; центр позитивного заряду молекули зміщується за напрямком зовнішнього поля, а центр негативних зарядів – проти поля. В результаті молекули стають диполями, осі яких збігаються з напрямом зовнішнього поля, а діелектрик набуває сумарного електричного моменту. Така поляризація називається *деформаційною*.

Відповідно, з теореми Гауса маємо для найпростішого конденсатора з плоскими паралельними пластинами $DS = Q$.

Оскільки

$$E = D / \epsilon_a = Q / \epsilon_a S \text{ і } E = U / d,$$

то ємність ідеалізованого елементарного конденсатора без урахування спотворення електричного поля на краях пластин буде

$$C=Q/U= \epsilon_a S/d.$$

Для збільшення S і зниження d у більшості випадків активну частину конденсаторів виконують у вигляді рулону з діелектричних шарів і тонких металевих шарів (фольги), що є обкладинками.

15.2 Діелектричні матеріали, що використовуються в конденсаторі ЄН

У різних типах конденсаторів ЄН використовують газоподібні, рідкі та тверді діелектрики. Газоподібні діелектрики мають значення $\epsilon = 1 \dots 2$.

Більшість твердих діелектриків мають $\epsilon \approx 2 \dots 8$. Найбільше ϵ мають деякі типи рідких діелектриків. Так, у метилового спирта $\epsilon \ll 30$, у гліцерина $\epsilon \ll 56$, у хімічно чистої (дистильованої) води - $\epsilon \ll 80$.

Повітряні конденсатори, конденсатори з твердим діелектриком і електролітичні використовуються в основному в радіотехніці, автоматичі і побутових приладах. Конденсатори з рідким діелектриком у цей час знаходять обмежене застосування. Масляні конденсатори застосовувалися раніше в ЄН. Сучасні ЄН виконуються з плівковими і плівково-паперовими конденсаторами з вакуумним просоченням діелектрика, а іноді і з паперово-олійними. У деяких випадках при низькій напрузі ЄН (не більше 100...200 В) і позитивних температурах (не більше + 40 ° С) застосовують електролітичні конденсатори.

15.3 Конструктивний вигляд конденсаторів ЄН

Основним елементом активного об'єму конденсатора є секція. Найбільш поширеним типом секцій є рулонна секція (рисунки 15.4, 15,5).

Для секцій з прихованою фольгою ширина фольги декілька вужча плівки (паперу, комбінованого діелектрика) - на подвоєне значення закраїни, яка становить 7...10 мм. У секціях з виступаючою фольгою ширина фольги вибирається так, щоб фольга виступала з кожного торця секції на 2...3 мм від країв плівки, що дозволяє усі витки фольги з'єднувати з торцевих сторін секції і зробити виводи обкладок, тоді як у першому випадку виводи секцій виконуються за допомогою металевих вкладишів (4, 7 на рисунку 15.6).

Секція намотується на спеціальну оправку. Робоча напруга секції зазвичай не перевищує 5 кВ. Тому при номінальних напругах на конденсаторі в 15...20 кВ і вище конденсатори складають з декількох послідовно з'єднаних секцій або груп секцій. За технологічних міркувань ємність секції при напрузі близько 5 кВ не перевищує значення 1,5...2 мкФ.

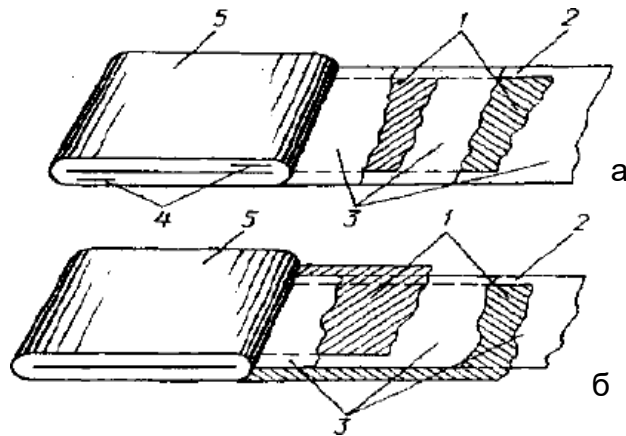


Рисунок 15.4 – Способи намотування секцій конденсатора: а – з прихованою фольгою; б – з виступною фольгою (1 – обкладка; 2 – закраїни; 3 – листи плівки (паперу); 4 – виводи секції; 5 – секції)

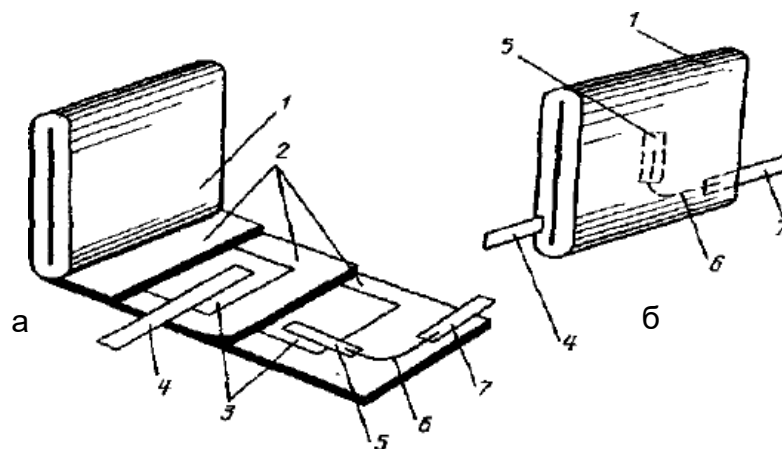


Рисунок 15.5 – Секції: а – напіврозібрана; б – секція в зборі:
1 – секція; 2 – конденсаторний папір (плівка);
3 – обкладинка з алюмінієвої фольги; 4, 5, 7 – металеві вкладиші
(4, 7 – виводи секції); 6 – плавкий запобіжник

У конденсаторах великої ємності на робочу напругу до 5 кВ при паралельному з'єднанні секцій вони з'єднуються з головними шинами конденсатора через плавкі вставки-запобіжники (рисунок 15.5). Це дозволяє підвищити надійність і робочу напруженість поля, так як пробій однієї або декількох секцій не призводить до виходу конденсатора з ладу (пробиті секції відключаються за допомогою розриву плавкої вставки).

Для того, щоб при згорянні запобіжника в разі пробою секції не розривалися сусідні секції, запобіжників розташовують між секціями, як показано на рисунку 15.5 [3].

Розташування виводів один над одним не завжди доцільно, тому що ускладнює паралельне з'єднання секцій. Тому іноді виводи розташовують зі зміщенням один щодо одного по довжині обкладок (пунктир на рисунку 15.5). Однак такий спосіб розташування виводів збільшує індуктивність секції.

Треба зазначити, що різновидом конденсатора є *іоністор* (суперконденсатор, ультраконденсатор, двошаровий електрохімічний конденсатор) – електрохімічний пристрій, конденсатор з органічним або неорганічним електролітом, обкладинками в якому служить подвійний електричний шар на кордоні розділу електрода і електроліту. Вони бувають:

- іоністори з ідеально поляризованими вуглецевими електродами;
- гібридні іоністори;
- псевдоконденсатори - іоністори, що використовують оборотні електрохімічні перетворювачі.

З появою іоністорів стало можливим використовувати конденсатори в електричних колах не тільки як перетворювальний елемент, але і як джерело струму.

Такі елементи мають декілька переваг над звичайними хімічними джерелами струму – гальванічними елементами та акумуляторами:

- високі швидкості заряду й розряду;
- простота зарядного пристрою;
- мала деградація, навіть після сотень тисяч циклів заряду / розряду;
- мала вага в порівнянні з електролітичними конденсаторами подібної ємності;
- низька токсичність матеріалів;
- висока ефективність (ККД більше 95 %);
- неполярні (хоча на іоністорах і зазначені «+» і «-», це робиться для позначення полярності залишкової напруги після його заряду на заводі-виробнику).

Недоліки іоністорів:

- питома енергія менша, ніж у традиційних джерел (1...3 Вт·год/кг при 30...40 Вт·год/кг для батарейок);
- напруга залежить від ступеня зарядженості;
- можливість вигорання внутрішніх контактів при короткому замиканні;
- малий термін служби (сотні годин) на граничних напругах заряду;
- великий внутрішній опір в порівнянні з традиційними конденсаторами (50...100 Ом у іоністора 1Ф x 5,5 В);
- значно більший, у порівнянні з акумуляторами саморозряд: близько 1 мкА у іоністора 2Ф x 2.5В.

Таким чином, у порівнянні з електрохімічними акумуляторами ЄН мають меншу питому енергію (до 25 Вт·год/кг), але на порядки вищі величини питомої потужності (до 15 кВт/кг) і значно більше число зарядно-розрядних циклів (до мільйона циклів). ЄН використовуються в пристроях імпульсної техніки, як накопичувачі електричної енергії, для стартерного запуску і для рекуперації енергії гальмування автомобілів, тепловозів, катерів, для згладжування пікових навантажень в електромережах, в різних портативних пристроях і т. ін.

16 ІНДУКТИВНІ НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ

В індуктивних накопичувачах (ІН) енергія акумулюється у вигляді енергії магнітного поля. ІН – це є котушка з індуктивністю L , по якій тече струм i , завдяки чому створюється магнітне поле з енергією

$$W = 0.5Li^2. \quad (16.1)$$

Крім індуктивної котушки енергоустановка з ІН містить джерело живлення ДЖ (зарядний пристрій), комутатори $K1$ і $K2$, навантаження H , наприклад, як показано на рисунку 16.1, а.

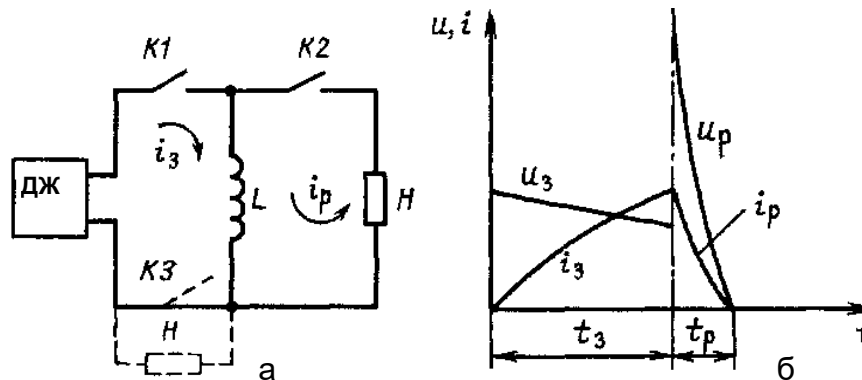


Рисунок 16.1 – Схема простого ІН (а) і характер зміни в ньому струмів і напруги (б)

При підключенні ІН до ДЖ за допомогою $K1$ здійснюється режим заряду ІН протягом часу (рисунок 16.1, б). При замиканні $K2$ і розмиканні $K1$ струм ІН тече через H і основна частина накопиченої енергії передається навантаженню протягом часу розряду t_p . Зазвичай реалізуються режими $t_p < t_3$ ($t_p \ll t_3$), або завдяки чому потужність ІН при розряді істотно більше потужності зарядного циклу. Тому ІН, подібно до інших типів накопичувачів, можна використовувати як трансформатор потужності - він забезпечує короткочасне живлення потужних споживачів електроенергії при розряді після відносно тривалого періоду запасання енергії при заряді.

Особливість ІН полягає також у тому, що в момент замикання $K2$ і розмикання $K1$ його можна розглядати як джерело струму, оскільки при перемиканні ІН на активне навантаження струм у ньому повинен зберігатися безперервним незалежно від структури зовнішнього кола. Якщо опір кола навантаження великий, то завдяки постійності струму в момент перемикавання напруга на затискачах ІН досягає великих значень, багаторазово переважаючих напругу джерела живлення, що заряджає накопичувач. Таким чином, за допомогою ІН можна забезпечити перетворення електричної енергії з істотним підвищенням потужності та напруги. Характер зміни струмів і напруг ІН у часі при заряді й розряді показано на рисунку 16, б.

Електрична схема ІН спрощується, якщо гілка з комутатором К2 відсутня, а навантаження Н з паралельним комутатором К3 включається послідовно з ІН, як показано пунктиром на рисунку 16, а. У такій схемі К1 служить лише для початкового підключення ДЖ і залишається включеним на весь робочий період з заданим числом циклів, а живлення навантаження здійснюється періодичним замиканням і розмиканням К3. При замкнутому К3 струм в індуктивності L наростає до I_{\max} , при розмиканні К3 струм тече через навантаження і падає до I_{\min} . Різниця $0,5L(I_{\max}^2 - I_{\min}^2)$ за вирахуванням втрат визначає енергію, передану навантаженню за один цикл. Така схема раціональна при циклічному живленні навантаження з частотами $f \approx 1$ Гц і більше. Її перевагою є використання при заряді і розряді тільки одного комутатора. Недолік схеми – замикання розрядного струму при підвищеній напрузі через ДЖ.

16.1 Переваги і недоліки, галузь застосування індуктивних накопичувачів

Крім процесів, пов'язаних з накопиченням і виводом енергії, в ІН велику роль відіграють електромагнітні сили і створювані ними механічні напруги, оскільки в ІН протікають значні струми при сильних магнітних полях. Також через великі струми першорядне значення має правильна організація процесів охолодження котушок.

Таким чином, аналіз ІН повинен охоплювати спільний розгляд електромагнітних і теплових процесів з урахуванням міцності котушок і конструктивних елементів ІН.

Перевагами ІН є: простота і статичність конструкції, хороші енергетичні і масогабаритні показники (при рівні енергії, що запасується більш $10^5 \dots 10^6$ Дж, характерні значення питомої енергії ІН можуть досягати 5...10 Дж/г і більше), можливість заживлення від низьковольтних нерегульованих джерел, висока надійність.

До недоліків ІН можна віднести необхідність використання швидкодіючих силових комутаторів (розмикачів), великі електродинамічні зусилля в активній зоні і, відповідно, наявність міцності елементів, ускладнення системи охолодження.

Область застосування ІН досить широка. Вони використовуються для короткочасного живлення потужних споживачів електроенергії в електрофізичних установках [3], технологічному обладнанні, автономних електроенергетичних системах і т. ін. Обговорюються проекти створення потужних ІН у промисловій енергетиці [1-3]. Нові види застосування ІН пов'язані з роботами з керованим термоядерним синтезом, а також зі створенням електродинамічних прискорювачів мас (макротіл), що дозволяють розганяти об'єкти до швидкостей порядку десятків кілометрів у секунду. Накопичувач підключається безпосередньо до рельсотрону прискорювача і забезпечує його живлення великими струмами при високих

напругах. Установки такого типу можуть служити для виведення в космос необхідної апаратури, видалення із Землі екологічно шкідливих відходів, створення реактивної тяги і т.ін.

16.2 Основні типи індуктивних накопичувачів, їх параметри і показники

Існують два основних класи конструктивного виконання ІН:

- лінійні накопичувачі, в яких котушки (витки) розташовуються навколо прямолінійної осі;
- тороїдальні ІН (θ -типу), в яких котушки (витки) охоплюють кільцеву центральну лінію.

Лінійні ІН конструктивно прості і технологічні, забезпечують хороше використання активного матеріалу, але створюють значні магнітні поля в навколишньому просторі. Бувають з котушками циліндричної, кільцеподібної, соленоїдальної і сферичної форми.

Тороїдальні ІН (θ -типу) поступаються лінійним за масогабарітними показниками, мають ускладнену конструкцію, дозволяють практично повністю усунути зовнішні магнітні поля, що в багатьох випадках відіграє визначальну роль при розробленні відповідних енергоустановок.

Розглянемо спочатку параметри і показники лінійних ІН з котушками циліндричної форми, а потім проведемо аналогічний аналіз для тороїдальних ІН різної геометрії.

Індуктивний накопичувач у вигляді циліндричних котушок прямокутного перетину

Осьова довжина котушки l , радіальна висота (товщина) h і середній діаметр d передбачаються сумірними (рисунок 16.2, а).

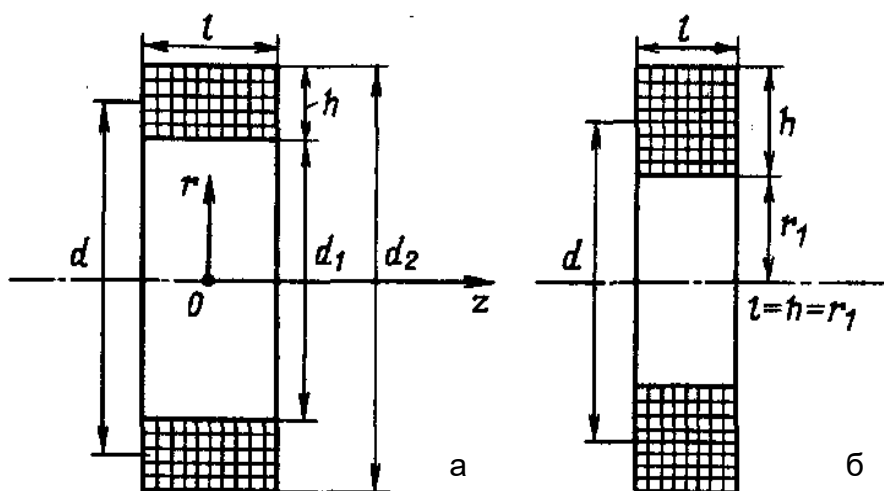


Рисунок 16.2 – Циліндрична котушка з прямокутним перетином (а) і котушка Брукса (б)

Індуктивність циліндричної котушки з w витками розраховується за формулою

$$L_{\text{ц}} = \frac{\mu_0}{4\pi} w^2 k_{\phi 1} d,$$

де $k_{\phi 1}$ – коефіцієнт форми, що залежить від відносних розмірів перетину котушки, від співвідношень $l^* = l/d$, $h^* = h/d$.

Для котушки з квадратним перетином ($l = h$)

$$L'_{\text{ц}} = \frac{\mu_0}{8\pi} w^2 k_{\phi 2} d.$$

Максимальну індуктивність при заданому об'ємі дроту має котушка Брукса, в якій $l^* = h^* = 1/3$ (точніше, 0,3367) або $l = h = r_1$, де r_1 – внутрішній радіус (рисунок 16.2, б).

Основне розрахункове рівняння циліндричного ІН, яке з'єднує накопичену енергію $W_{\text{ц}} = 0,5 L_{\text{ц}} i_{\text{ц}}^2$, розміри і допустиму густину струму в провідниках, має вигляд

$$W_{\text{ц}} = \frac{\mu_0}{8\pi} k_{\phi 1} (k_{\text{з,ц}} J_{\text{ц}} l_* h_*)^2 d^5.$$

Оскільки маса дроту циліндричного ІН

$$M_{\text{ц}} = \gamma \pi d^3 k_{\text{з,ц}} l_* h_*$$

Тороїдальні індуктивні накопичувачі

У тороїдальних котушках θ -типу витки зі струмом розміщуються на тороїдальній поверхні й охоплюють кільцеву центральну лінію. Лінії магнітної індукції основного поля замикаються навколо осі тора (рисунок 16.3, а).

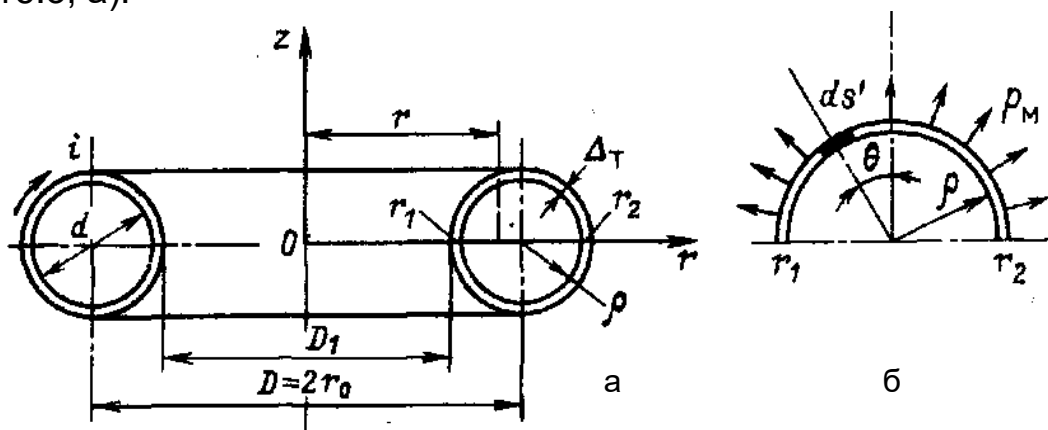


Рисунок 16.3 – Схема дії індуктивного накопичувача: а – тонка тороїдальна котушка; б – сили магнітного тиску у тороїдальній котушці

Для ідеального тора з однорідним струмовим шаром усе магнітне поле зосереджено всередині тороїдальної поверхні. В реальних конструкціях є зовнішні магнітні поля, але вони загасають у багато разів швидше, ніж у котушках дипольного типу, що є головною перевагою тороїдальних ІН.

Розглянемо спочатку тонку тороїдальну котушку (з малою товщиною токового шару), що має круговий меридіональний перетин (рисунок 16.3, а).

Її індуктивність

$$L_T = 0.5 \mu_0 w^2 D (1 - \sqrt{1 - d_*^2}),$$

де D – великий діаметр тора; d – діаметр перетину, $d_* = d/D$.

Нехай при товщині намотування тороїдальної котушки (Δ_T), яка приймається сталою, при коефіцієнті заповнення котушки ($k_{зк}$) на діаметрі (D) й струмі (i) в індуктивному накопичувачі запасається енергія

$$W_T = 0.5 L_T i^2 = 0.25 \mu_0 \pi^2 (k_{зк} J_T \Delta_{*T} d_*)^2 (1 - \sqrt{1 - d_*^2}) D^5,$$

де $\Delta_{*T} = \Delta_T / d$ ($\Delta_{*T} \ll 1$).

Існує велике різноманіття конструктивних рішень ІН. Маючи в своєму розпорядженні заданий об'єм (або масу) активного струмопроводу, можна виготовити з нього безліч накопичувачів різної форми, кожен з яких характеризується своїми масогабаритними, енергетичними, міцностними і економічними показниками. При розрахунку і конструюванні ІН необхідно враховувати умови його роботи, обмеження на масу і розміри, ефективність використання активного матеріалу, поширення магнітного поля в навколишньому просторі, електродинамічні і механічні напруги в активній зоні і конструктивних елементах, теплові режими, які визначаються системою охолодження ІН, особливості перехідних процесів, що залежать від електричної схеми ІН і використовуваної в ній апаратури (наприклад, комутаторів) і т. ін. Тому оптимальне проектування установок з ІН – складна комплексна проблема, яка потребує детального вивчення багатьох різнорідних чинників.

ВИСНОВКИ

Перспективи розвитку накопичувачів енергії ведуть до загальної вимоги – підвищення питомих показників.

Напрямки розвитку хімічних накопичувачів спрямовано на пошук нових електрохімічних систем на основі Li і високотемпературних сірчанонатрієвих систем.

Водневі системи – характерний напрямок пошуку створення металгідридних накопичувачів.

Для теплових накопичувачів найбільш перспективним є пошук матеріалів з низькими температурами фазових переходів.

Для механічних накопичувачів – це створення нових композитних накопичувачів, серед них є основні напрямки пошуку:

- композитні матеріали;
- високоефективні підвіси;
- перетворювачі.

Ємнісні накопичувачі – основний напрямок створення високоемнісних конденсаторів, зокрема, з подвійним електричним шаром.

Індуктивні накопичувачі – створення високотемпературних надпровідних накопичувачів.

У наш час хімічні джерела струму використовуються майже в усіх галузях техніки і народного господарства. Для широкого діапазону технічних додатків розроблено джерела струму різної електрохімічної природи і різного конструктивного виконання. В усьому світі промисловістю випускаються джерела струму кількох десятків електрохімічних систем, які забезпечують велику різноманітність можливостей використання і високу ефективність роботи в широкому діапазоні умов експлуатації.

Як накопичувачі енергії можливе використання надпровідних індуктивних накопичувачів, інерційних накопичувачів, конденсаторів з подвійним електричним шаром або суперконденсаторів. Суперконденсаторні накопичувачі можливо використовувати для підтримки на акумуляторних батареях стабільної напруги протягом робочої зміни електровоза. Застосовують гібридні накопичувачі, що складаються з акумулятора та суперконденсатора, якщо пікові значення струмів навантаження перевищують середні значення не менше, ніж у 5 – 7 разів. Гібридний накопичувач переважно встановлювати на акумуляторних, контактних - акумуляторних електровозах і на тягових агрегатах.

Таким чином, цей курс лекцій з вивчення принципів роботи, особливостей експлуатації різних типів накопичувачів енергії посприє в проектуванні енергетичних установок для будь-яких потреб космічного чи наземного призначення.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Безручко, К. В. Автономные наземные энергетические установки на возобновляемых источниках энергии: учеб. пособие / К. В. Безручко, С. В. Губин. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 300 с.
2. Солнечные энергосистемы космических аппаратов. Физическое и математическое моделирование / К. В. Безручко, Н. В. Белан, Д. Г. Белов и др.; под ред. акад. НАН Украины С. Н. Конюхова. – Харьков: Гос. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2000. – 515 с.
3. 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.
4. Белан, Н. В. Бортовые энергосистемы космических аппаратов на основе солнечных и химических батарей / Н. В. Белан, К. В. Безручко, В. Б. Елисеев. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1992. – 124 с.
5. Хрусталеv, Д. А. Аккумуляторы / Д. А. Хрусталеv. – М.: Изумруд, 2003. – 224 с.
6. Романов, В. В. Химические источники тока / В. В. Романов, Ю. М. Хашев. – М. : Сов. радио. 1978. - 264 с.
7. Кошель, М. Д. Теоретичні основи електрохімічної енергетики: підручник / М. Д. Кошель. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2002. – 430 с.
8. Теньковцев, В. В. Основы теории и эксплуатации герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов / В. В. Теньковцев, Б. И. Центер. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 96 с.
9. Безручко, К. В. Расчет ХИТ на основе математических моделей ХАИ / К. В. Безручко, В. В. Ковалевский. – Харьков: ХАИ, 1995. – 48 с.
10. Кривцов, В. С. Неисчерпаемая энергия. В 4 кн. Кн. 3. Альтернативная энергетика: учебник / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков: ХАИ; Севастополь : Севаст. нац. техн. ун-т, 2006. – 642 с.
11. Коровин, Н. В. Электрохимическая энергетика / Н. В. Коровин. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 264 с.
12. Лидоренко, Н. С. Электрохимические генераторы / Н. С. Лидоренко, Г. Ф. Мучник. – М. : Энергоиздат, 1982. – 448 с.
13. Шпильрайн, Э. Э. Введение в водородную энергетику / Э. Э. Шпильрайн, С. П. Малышенко, Г. Г. Кулешов ; под ред. В. А. Легасова. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 264 с.

14. Губін, С. В. Проектування сонячних енергоустановок: навч. посіб. для курс. та дипл. проектування / С. В. Губін, С. В. Сінченко. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2019. – 70 с.
15. ГОСТ 15596-78. Источники тока, химические. Термины и определения. – Введен 01.06.2002. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 30 с.
16. ГОСТ Р МЭК 60623-2002. Аккумуляторы и батареи щелочные. Аккумуляторы никель-кадмиевые открытые призматические. – Введен 01.07.2003. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 12 с.
17. ГОСТ 26881-86. Аккумуляторы свинцовые стационарные. Общие технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 16 с.
18. Безручко, К. В. Анализ причин снижения ресурса электрохимических аккумуляторов энергоустановок ракетно-космической техники / К. В. Безручко, А. О. Давидов, С. В. Синченко, С. В. Ширинский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 8(55). – С. 145–149.
19. Таганова, А. А. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации: справочник / А. А. Таганова, Ю. И. Бубнов, С. Б. Орлов. – СПб. : Химиздат, 2005. – 264 с.

Навчальне видання

Сінченко Світлана Володимирівна

АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ

Редактор Є. О. Александрова

Зв. план, 2019

Підписано до видання 25.09.2019

Ум. друк. арк. 6,1. Обл.-вид. арк. 6,31. Електронний ресурс

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
<http://www.khai.edu>
Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001