

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

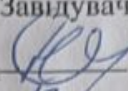
Кафедра теоретичної електротехніки

«На правах рукопису»

УДК 621.354

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Микола ОСТРОВЕРХОВ

«17» 06 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-науковою програмою «Електроенергетика та електромеханіка»

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

на тему: «Електромагнітні процеси у системі накопичення електроенергії
на основі електрохімічної технології»

Виконав:

Студент II курсу, групи ЕВ-21мн

Лісовий Олександр Романович

Науковий керівник:

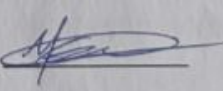
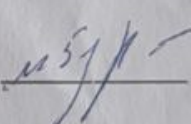
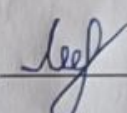
Доцент кафедри ТЕ, к.т.н., доцент,

Бурик Микола Петрович

Рецензент:

Старший викладач кафедри ВДЕ, к.т.н., доцент,

Болотний Микола Петрович



Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент



Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

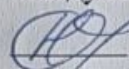
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-наукова програма «Електроенергетика та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



Микола ОСТРОВЕРХОВ

«17» 06 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Лісовому Олександров Романовичу

1. Тема дисертації «Електромагнітні процеси у системі накопичення електроенергії на основі електрохімічної технології», науковий керівник дисертації Бурик Микола Петрович, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «25» 03 2024 р. № 1443-С

2. Термін подання студентом дисертації: 10.06.2024

3. Об'єкт дослідження: система накопичення електроенергії на основі електрохімічної технології.

4. Вихідні дані: система накопичення електроенергії з DC-DC перетворювачем

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Проаналізувати системи накопичення електроенергії та визначити, які системи мають найбільше переваг.

2. Виконати дослідження існуючих типів акумуляторних батарей, порівняти їхні характеристики та визначити найперспективніші типи батарей.

3. Провести дослідження існуючих еквівалентних схем заміщення акумуляторних батарей.

4. Провести налаштування системи підпорядкованого регулювання координатами системи накопичення електроенергії на симетричний та модульний оптимуми.

5. Виконати синтез нового алгоритму керування напругою розряду акумулятора.

6. За допомогою програмного середовища MATLAB Simulink виконати моделювання системи накопичення з робастним регулятором розряду акумуляторної батареї.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: принципові схеми роботи системи накопичення енергії, структурні схеми акумуляторних батарей, еквівалентні схеми заміщення акумуляторних батарей, принципові схеми перетворювачів напруги, структурна схема підпорядкованого керування, електрична схема DC-DC перетворювача, імітаційні моделі системи накопичення енергії та її регуляторів, графіки перехідних процесів координат системи.

7. Орієнтовний перелік публікацій: три статті, одна з яких фахова.

8. Дата видачі завдання 08.03.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз існуючих систем накопичення енергії	31.03.2024	<i>m syk</i>
2	Структура системи накопичення електроенергії на основі електрохімічної технології	14.04.2024	<i>m syk</i>
3	Дослідження перехідних та усталених процесів у системі накопичення електроенергії	05.05.2024	<i>m syk</i>
4	Розробка покращеної системи накопичення електричної енергії	26.05.2024	<i>m syk</i>
5	Написання висновків та оформлення магістерської дисертації	09.06.2024	<i>m syk</i>

Студент

Науковий керівник

[Signature]
m syk

Олександр ЛІСОВИЙ

Микола БУРИК

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з 124 сторінок, 47 рисунків, 6 таблиць, вступу, основної частини з 4-х розділів, висновків по розділам, загального висновку та переліку використаної літератури.

Актуальність теми. Електромагнітні процеси у акумуляторних батареях впливають на ефективність роботи системи накопичення. Розуміння процесів є дуже важливим для вдосконалення існуючих та розробки нових акумуляторів з більшою ємністю, потужністю, терміном експлуатації та безпекою використання. Проведення дослідження електрохімічних процесів в акумуляторах є актуальним питанням у зв'язку із зростанням попиту на використання акумуляторів в енергетичних установках та електротранспорті.

Впровадження сучасних типів акумуляторних батарей та покращення характеристик існуючих акумуляторів приведе до поліпшення економічних показників та зменшення впливу на навколишнє середовище. У свою чергу системи накопичення електричної енергії керуються традиційними системами регулювання на основі алгоритмів керування компенсаційного типу. Ці контролери налаштовуються на модульний та симетричний оптимуми та компенсують необхідні ланки об'єкта керування. У результаті контролери складаються з пропорційних та інтегральних коефіцієнтів. Параметричні та координатні збурення у цих системах призводять до погіршення показників якості керування та енергетичних процесів електрохімічного перетворення енергії. Наприклад зміна параметрів Li-ion батарей.

Мета роботи полягає у покращенні енергетичних характеристик в усталених та перехідних режимах роботи акумуляторної системи накопичення електроенергії через впровадження покращеної системи керування контролером розряду акумуляторної батареї, яка базується на концепції зворотних задач динаміки в сполучені з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергії.

За для виконання поставленої мети було визначено та вирішено такі завдання:

1. Проаналізовано системи накопичення енергії та визначено, що системи на основі електрохімічної технології мають найбільше переваг.
2. Виконано дослідження існуючих типів акумуляторних батарей, порівняно їхні характеристики та визначено найперспективніші типи батарей.
3. Проведено дослідження існуючих еквівалентних схем заміщення акумуляторних батарей.
4. Проведено налаштування системи підпорядкованого регулювання координатами системи накопичення електроенергії на симетричний та модульний оптимуми.
5. Виконано синтез нового алгоритму керування напругою розряду акумулятора.
6. За допомогою програмного середовища MATLAB Simulink виконано моделювання системи накопичення з робастним регулятором розряду акумуляторної батареї.

Об'єкт дослідження: система накопичення електроенергії на основі електрохімічної технології.

Предметом дослідження є електромагнітні процеси та енергетичні характеристики у системах накопичення електроенергії на основі електрохімічної технології в усталених та перехідних режимах.

Методи дослідження. Для вирішення запланованих задач використовувались методи теорії автоматичного керування та теорія лінійних і нелінійних електричних кіл. Дослідження електромагнітних процесів здійснювались за допомогою математичного моделювання з використанням сучасних комп'ютерних програм Mathcad та MATLAB.

Наукова новизна. Вдосконалення систем накопичення електричної енергії за рахунок застосування грубих законів керування.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці сучасних систем накопичення електричної енергії з ефективним електрохімічним

перетворенням енергії. Простота практичної реалізації здійснюється за рахунок використання алгоритмів керування на основі зворотних задач динаміки.

Апробація результатів дисертації. Результати дослідження, які включені до роботи були представлені на наступних конференціях:

1. Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики". – Київ: ФЕА НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕА 2022 р.

2. Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики". – Київ: ФЕА НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕА 2023 р.

Згідно теми роботи було опубліковано тези доповідей та дві статті, одна з яких фахова. Статті були висвітлені у таких виданнях:

1. Бурик І.П. Приладове моделювання польових транзисторів із каналом у вигляді двовимірних матеріалів / І.П. Бурик, С. Павленко, А. Биркун, Л.В. Олгодворець, М.П. Бурик, О.Р. Лісовий // Тези доповідей за матеріалами Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика-2024». – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2024. – С 121-122.

2. Лісовий О.Р. Системи накопичення енергії / О.Р. Лісовий, М.П. Бурик, В.Ю. Лободзинський // Доповідь за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики". – Київ: ФЕА НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. – С 360-365.

3. M. Buryk, V. Lobodzinsky, I. Buryk, O. Lisovyi, Numerical modeling of electrical parameters of LiFePO_4 batteries, «Technology audit and production reserves», Kharkiv, Ukraine, URL: <https://journals.uran.ua/tarp/issue/archive>.

Ключові слова: АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ, АКУМУЛЯТОРНА СИСТЕМА НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ЕЛЕКТРОХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, КОНТРОЛЕР, МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ НАПРУГИ.

ABSTRACT

The master's thesis consists of 124 pages, 47 figures, 6 tables, an introduction, the main part of 4 chapters, conclusions by chapters, a general conclusion and a list of used literature.

Actuality of theme. Electromagnetic processes in storage batteries affect the efficiency of the storage system. Understanding the processes is very important for improving existing and developing new batteries with higher capacity, power, lifetime and safety of use. Conducting research on electrochemical processes in batteries is an urgent issue in connection with the growing demand for the use of batteries in power plants and electric transport.

The introduction of modern types of storage batteries and the improvement of the characteristics of existing batteries will lead to improved economic performance and reduced impact on the environment. In turn, electric energy storage systems are controlled by traditional regulation systems based on compensation-type control algorithms. These controllers adjust to modular and symmetric optimums and compensate for the necessary links of the control object. As a result, the controllers consist of proportional and integral coefficients. Parametric and coordinate perturbations in these systems lead to deterioration of control quality indicators and energy processes of electrochemical energy conversion. For example, changing the Li-ion batteries parameters.

The purpose of the work is to improve the energy characteristics in the stable and transient modes of operation of the battery system of electricity storage through the implementation of an improved management system of the battery discharge controller, which is based on the concept of inverse problems of dynamics combined with the minimization of local functionals of instantaneous energy values.

The following tasks were defined and solved in order to fulfill the set goal:

1. Energy storage systems were analyzed and it was determined that systems based on electrochemical technology have the most advantages.

2. The study of existing types of storage batteries was carried out, their characteristics were compared, and the most promising types of storage batteries were determined.

3. A study of existing equivalent battery replacement schemes was conducted.

4. The adjustment of the system of cascade regulation by the coordinates of the electricity storage system to the symmetric and modular optimum has been carried out.

5. The synthesis of a new battery discharge voltage control algorithm was performed.

6. Using the MATLAB Simulink software environment, the simulation of the storage system with robust battery discharge regulator was performed.

The object of research: a system of electricity storage based on electrochemical technology.

The subject of research is electromagnetic processes and energy characteristics in electricity storage systems based on electrochemical technology in stable and transient modes.

Research methods. Methods of automatic control theory and the theory of linear and non-linear electric circuits were used to solve the planned problems. Studies of electromagnetic processes were carried out with the help of mathematical modeling using modern computer programs Mathcad and MATLAB.

Scientific novelty. Improvement of electrical energy storage systems due to the application of rough control laws.

The practical significance of the obtained results lies in the development of modern electrical energy storage systems with efficient electrochemical energy conversion. Ease of practical implementation is achieved through the use of control algorithms based on inverse dynamics problems.

Approbation of the results of the dissertation. The research results included in the work were presented at the following conferences:

1. International scientific and technical conference of young scientists, graduate students and students "Modern problems of electrical engineering and automation". –

Kyiv: Faculty of Electric Power Engineering and Automatics, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2022.

2. International scientific and technical conference of young scientists, graduate students and students "Modern problems of electrical engineering and automation". - Kyiv: Faculty of Electric Power Engineering and Automatics, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023.

Abstracts of reports and two articles, one of which is professional, were published according to the topic of the work. The articles were covered in the following publications:

1. I. Buryk Device modeling of field-effect transistors with a channel in the form of two-dimensional materials / I. Buryk, S. Pavlenko, A. Birkun, V. Lobodzinsky, M. Buryk, O. Lisovyi // Abstracts of reports based on the materials of the International Conference of Students and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics "Eureka-2024". – Lviv: Ivan Franko National University of Lviv, 2024. - P. 121-122.

2. O. Lisovyi Energy storage systems / O. Lisovyi, M. Buryk, V. Lobodzinsky // Report based on the materials of the International scientific and technical conference of young scientists, graduate students and students "Modern problems of electrical engineering and automation". - Kyiv: Faculty of Electric Power Engineering and Automatics, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023. - P. 360-365.

3. M. Buryk, V. Lobodzinsky, I. Buryk, O. Lisovyi, Numerical modeling of electrical parameters of LiFePO₄ batteries, "Technology audit and production reserves", Kharkiv, Ukraine. URL: <https://journals.urau.ua/tarp/issue/archive>.

Keywords: BATTERY, BATTERY ELECTRICAL ENERGY STORAGE SYSTEM, ELECTROCHEMICAL TECHNOLOGY OF ELECTRICAL ENERGY STORAGE SYSTEM, CONTROLLER, MATHEMATICAL MODELS, VOLTAGE CONVERTER.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	13
ВСТУП.....	14
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ	16
1.1 Механічні системи накопичення енергії.....	16
1.1.1 Гравітаційні накопичувачі енергії	17
1.1.2 Маховикові накопичувачі енергії	18
1.1.3 Гідроакумуюча електростанція (ГАЕС)	19
1.1.4 Накопичувачі енергії на стисненому повітрі.....	21
1.2 Теплові системи накопичення енергії	23
1.2.1 Накопичувачі явного тепла	24
1.2.2 Накопичення прихованого тепла.....	27
1.2.3 Термохімічне накопичення енергії.....	29
1.3 Хімічні системи накопичення енергії	31
1.3.1 Накопичення хімічної енергії на синтетичному природньому газі	32
1.3.2 Накопичення хімічної енергії за допомогою сонячної енергії.....	32
1.3.3 Накопичення хімічної енергії завдяки використанню водню	33
1.4 Електричні системи накопичення енергії.....	34
1.4.1 Надпровідна магнітна система накопичення енергії.....	35
1.4.2 Конденсатори - накопичувачі електричної енергії.....	36
1.4.3 Суперконденсатори.....	37
1.5 Електрохімічні системи накопичення енергії	39
1.5.1 Акумуляторна система накопичення енергії.....	40
1.5.1.1 Свинцево-кислотні акумулятори.....	40

	11
1.5.1.2 Нікель-метал-гідридні Ni-Mh акумулятори.....	42
1.5.1.3 Літій-іоні Li-ion акумулятори	44
1.5.1.4 Літій-полімерні Li-Pol акумулятори.....	46
1.5.1.5 Літій-залізо фосфатні LiFePO ₄ акумулятори.....	49
1.5.2 Накопичення енергії у проточних акумуляторах	51
1.5.2.1 Цинк-бромні ZnBr проточні акумулятори.....	51
1.5.2.2 Ванадієві акумулятори.....	52
1.5.2.3 Полісульфідно-бромідні акумулятори	53
1.5.3 Гібридні системи накопичення енергії.....	54
Висновки до першого розділу	55
2 СТРУКТУРА СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ	57
2.1 Основні параметри акумуляторних батарей	58
2.2 Математичні моделі акумуляторних батарей.....	62
2.3 Система керування акумулятором BMS	66
2.3.1 Захисти системи керування акумуляторною батареєю	67
2.3.2 Структурні схеми BMS.....	68
2.4 Перетворювачі системи накопичення електроенергії	70
2.4.1 Автономний перетворювач напруги	71
2.4.2 Мережевий перетворювач напруги	72
2.4.3 Гібридний перетворювач напруги	73
2.4.4 Схеми перетворювачів напруги.....	74
Висновки до другого розділу	76
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ТА УСТАЛЕНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	78

3.1 Система накопичення електроенергії з реверсивним <i>DC-DC</i> перетворювачем напруги.....	78
3.1.1 Конструкція системи накопичення	78
3.2 Типове налаштування систем на основі підпорядкованого регулювання координат	80
3.3 Двоконтурна система підпорядкованого керування з паралельним вмиканням регуляторів напруги в системах накопичення електричної енергії .	86
3.4 Перехідні процеси в системі накопичення електроенергії при різних типах акумуляторних батарей.....	91
Висновки до третього розділу.....	100
4 РОЗРОБКА ПОКРАЩЕНОЇ СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	103
4.1 Основи концепції зворотних задач динаміки в сполученні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих енергій руху.....	103
4.2 Синтез алгоритму керування напругою.....	106
4.3 Порівняльний аналіз систем накопичення електричної енергії з <i>PI</i> та <i>IPD</i> контролерами	109
Висновки до четвертого розділу.....	117
ВИСНОВКИ.....	118
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	120

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АБ – акумуляторна батарея

АСНЕ – акумуляторна система накопичення електроенергії

ВДЕ – відновлювальні джерела енергії

ВЕС – вітрова електростанція

ДБЖ – джерело безперебійного живлення

ЕСНЕ – електричні системи накопичення енергії

ККД – коефіцієнт корисної дії

ЛАХ – логарифмічна-амплітудна характеристика

СНЕ – система накопичення електричної енергії

СПГ – синтетичний природний газ

СЕС – сонячна електростанція

СПР – система підпорядкованого регулювання

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

BMS – система керування акумулятором

DoD – глибина розряду акумуляторної батареї

IPD-регулятор – регулятор на основі концепції зворотних задач динаміки

SoC – стан заряду акумуляторної батареї

SoH – стан «здоров'я» акумуляторної батареї

VFD – автономний перетворювач частоти

ВСТУП

З плином часу споживання електричної енергії зростає. Розвиток відновлювальних джерел енергії, електротранспорту, енергосистем та «розумних» мереж потребують ефективних та досконалих систем накопичення електроенергії. СНЕ на основі електрохімічної технології мають велику швидкість відгуку, можуть забезпечити потрібну кількість енергії протягом тривалого часу та вважається екологічно чистими.

Дослідження електромагнітних процесів у електрохімічних накопичувачах енергії є важливим питанням сучасності. Так як нові технології вимагають покращення існуючих та розробку нових типів акумуляторних батарей, які матимуть вдосконалені характеристики, такі як: ємність, потужність, кількість циклів заряд/розряд, відношення ємності та ваги батареї.

Типові системи керування процесом заряджання та розряджання акумуляторної батареї в АСНЕ, що ґрунтуються на *PI*-регуляторах напруги та струму, знаходяться у процесі дослідження [1]. Стійкість таких нелінійних систем не була підтверджена. Зазначені збурення в існуючих системах керування спричиняють погіршення електричних показників якості керування і зниження енергетичних характеристик в усталених та перехідних режимах в АСНЕ. Отже, підсистеми АСНЕ є взаємопов'язані та чутливі до змін координатних і параметричних збурень. Найбільше впливають варіації параметрів DC-DC перетворювачів.

Метою роботи є покращення енергетичних характеристик в усталених та перехідних режимах АСНЕ за допомогою використання модернізованої системи керування контролером заряду/розряду акумуляторної батареї.

Щоб вирішити поставлену мету, були визначені та вирішені наступні задачі: проведено дослідження наявних типів АБ та визначено найкращі типи акумуляторів; виконано дослідження існуючих методів керування зарядом та розрядом акумуляторної батареї; проведено синтез алгоритму керування напругою розряджання акумулятора; досліджено динамічні та статичні

характеристики електричних координат системи накопичення з робастним регулятором розряду АБ за допомогою моделювання у програмі MATLAB/Simulink.

Об'єктом дослідження являється система накопичення електроенергії на основі електрохімічної технології.

Предметом дослідження роботи є електромагнітні процеси у СНЕ на основі електрохімічної технології.

Наукова новизна. Вдосконалення систем накопичення електричної енергії за рахунок застосування алгоритму керування на основі концепції зворотних задач динаміки в сполучені з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергії.

Практичне значення результатів є розробка АСНЕ з покращеною ефективністю розряджання акумулятора та збільшеним терміном служби. За рахунок використання запропонованого алгоритму керування розряджанням батареї, модернізовані контролери можуть знизити глибину розрядки акумулятора DoD, покращуючи цим його загальну продуктивність.

У розділі №1 проведено аналіз існуючих систем накопичення енергії, обрано СНЕ на основі електрохімічних технологій як найоптимальніший варіант накопичення. Розділ №2 присвячений структурі СНЕ на основі електрохімічної технології, визначено головні системи структури. У третьому розділі досліджено перехідні та усталені процеси в СНЕ, проаналізовано типові алгоритми керування контролером заряду/розряду батареї. Четвертий розділ представляє покращену СНЕ з DC-DC контролером та демонструє результати його роботи. На завершення зроблено висновки по магістерській дисертації.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

1.1 Механічні системи накопичення енергії

Механічні системи накопичення енергії - це тип систем, які накопичують енергію перетворюючи її між механічною та електричними формами. За відсутності попиту на електричну енергію відбувається перетворення електричної енергії у механічну, яка зберігається у формі кінетичної чи потенціальної енергій. У години великого навантаження на енергосистему механічна енергія перетворюється назад у електричну.

Згідно з рисунком 1.1 механічні системи накопичення поділяються на чотири різні категорії: гравітаційні накопичувачі енергії, маховикові накопичувачі енергії, гідроакumuлююча електростанція та накопичувачі енергії на стисненому повітрі. У маховикових накопичувачах зберігається кінетична енергія, а в гідроакumuлюючих електростанціях, гравітаційних накопичувачах та накопичувачах на стисненому повітрі зберігається потенційна енергія.



Рисунок 1.1 – Класифікація механічних систем накопичення енергії

1.1.1 Гравітаційні накопичувачі енергії

Гравітаційні накопичувачі енергії накопичують енергію за наступним принципом: у час надлишкового виробництва електроенергії відбувається підняття важких вантажів на певну висоту, щоб у період пікового навантаження, за рахунок сили тяжіння, опускати цей вантаж, при цьому обертаючи турбіну генератора.

Компанією Gravity Power було запропоновано гравітаційний силовий модуль. Відповідний накопичувач використовує воду, щоб підняти поршень та надалі його опустити, щоб проштовхнути воду через гідрогенератор коли необхідна потужність. До складу силового модуля входить: великий поршень, який розташований у глибокій заповненій водою шахті; зворотна труба, що дозволяє воді протікати, та яка поєднана з електричною станцією. Електростанція складається з насоса, турбіни двигуна/генератору. У час відсутності великого споживання електроенергії, під час заряджання електрична енергія застосовується для приводу двигуна/генератора, який обертає насос, отже, відбувається перетворення електричної енергії у механічну. Під час прокачування води через зворотну трубу в шахту, насос перетворює механічну енергію на кінетичну енергію руху, що призводить до підняття поршня. Поршень залишається у високому положенні, доки не буде потрібна подальша подача потужності. Під час фази розряду, енергія створюється завдяки руху поршня вниз. Поршень спускаючись створює високий тиск на воду, яка рухається за годинниковою стрілкою через зворотну трубу. Кінетична енергія потоку перетворюється у механічну енергію турбіни, яка в свою чергу приводить у рух генератор, генеруючи електричну енергію [2, 3]. Потужність накопичення енергії відповідної технології залежить від висоти валу та розмірів поршня. Головною метою гравітаційної енергії є забезпечення потужності в межах від 40 МВт до 1.6 ГВт.

1.1.2 Маховикові накопичувачі енергії

У 1784 році в друку, на початку промислової революції, вперше було використано термін "махове колесо". Тоді маховики були основною складовою парових локомотивів та поїздів, а також використовувалися як засоби накопичення енергії на заводах [4]. Після падіння цін на сталь та чавун розпочалось виробництво маховиків цільними деталями. На початку маховики були застосовані в Швейцарії, у гібридному автобусі, відомому як гіробус. Ця інноваційна технологія використовувала маховики для накопичення енергії, що втрачалася при гальмуванні, з наступним використанням цієї енергії для подальшого руху автобуса. Вага відповідного маховика становила близько 1.5 т, а діаметр був рівним 1.6 м. У 1960-х та 1970-х роках була запропонована система накопичення енергії маховика для постійного джерела живлення, електромобілів та космічних місій.

Маховикові накопичувачі енергії – це механічні накопичувачі енергії, що використовують кінетичну енергію обертального руху, для збереження енергії у вигляді механічної [5]. Сучасна система накопичення енергії маховика складається з 5 основних елементів: маховик, вакуумна камера, магнітні підшипники, електричний двигун/генератор та блок перетворення й керування електричною енергією. Під час циклу заряджання електрична машина працює у режимі двигуна, який отримує живлення від зовнішньої електричної мережі. Двигун у свою чергу перетворює електричну енергію в механічну, обертаючи при цьому маховик на підвищеній швидкості, який зберігає кінетичну енергію. У період розряджання електрична машина вже працює у режимі генератора, збережена кінетична енергія маховика перетворюється назад у електричну.

Систему накопичення маховика класифікують на 2-і групи:

- низькошвидкісні, у яких маховик складається зі звичайної сталі, швидкість обертання якого становить менше 6 тис. об/хв;

– високошвидкісні, які застосовують високоміцні композитні матеріали для маховика, швидкість обертання маховика коливається від 20 до 100 тис. об/хв.

Маховикові накопичувачі енергії мають ряд переваг:

- тривалий термін служби;
- високий ККД сучасних конструкцій маховика – 90-95 %;
- швидка реакція;
- екологічно безпечні.

Основними недоліками вважаються:

- висока вартість;
- невелика ємність накопичення;
- високий саморозряд.

1.1.3 Гідроакumuлююча електростанція (ГАЕС)

Гідроакumuлююча електростанція є одним із розповсюджених механічних систем накопичення енергії. ГАЕС працює за принципом перекачування води, за допомогою електронасосу, з нижнього резервуара у верхній, у період надлишкової генерації потужності та за відсутності надмірного споживання електричної енергії. Перекачуючи воду електронасос споживає електроенергію перетворюючи її на механічну енергію, яка згодом перетворюється на потенційну енергію, за рахунок перекачування води з нижнього у верхній резервуари. Коли попит на електроенергію зростає, що зазвичай відбувається зранку та ввечері, накопичена вода у верхньому резервуарі повертається у нижній, перетворюючи потенційну енергію у кінетичну, яка обертаючи турбіну генератора перетворюється у електричну енергію. Величина накопиченої енергії у першу чергу залежить від різниці висот, на яких розміщені резервуари, та від об'єму води у цих резервуарах. На рисунку 1.2 зображена принципова схема роботи ГАЕС.

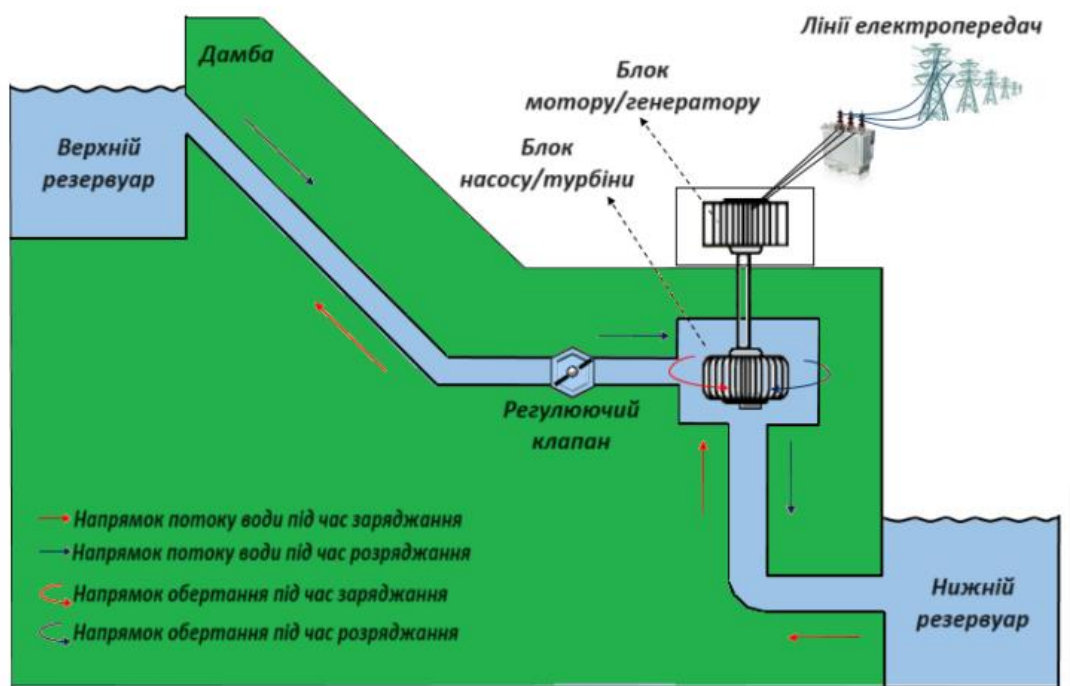


Рисунок 1.2 – Принципова схема роботи гідроакumuлюючої системи накопичення енергії [6]

Новітньою розробкою гідроакumuлюючої електростанції є підземна ГАЕС та ГАЕС з морською водою. Принцип роботи відповідних електростанцій дещо схожий до традиційної ГАЕС, проте у випадку підземної ГАЕС, для нижнього резервуару води застосовують старі шахти та кар'єри, а для морської – море. Основною перевагою таких станцій є економія ресурсів на будівництво. У майбутньому ці електростанції мають значний потенціал, по причині зменшення витрат на будівництво, а також через мінімальний вплив на навколишнє середовище.

Головними перевагами ГАЕС вважаються: довговічність, відсутність зовнішніх викидів у атмосферу, стабільність електропостачання, гнучкість у регулюванні потужності. У ГАЕС також є і свої недоліки, по-перше, існує необхідність у великих водоймах, по-друге, реалізація цієї станції потребує суттєвих витрат. Попри присутні недоліки ГАЕС залишається однією з найбільш розповсюджених механічних систем накопичення енергії.

1.1.4 Накопичувачі енергії на стисненому повітрі

Накопичення енергії у системі зберігання енергії на стисненому повітрі відбувається за рахунок стиснення повітря у спеціальній ємності. Об'єм накопиченої енергії залежить у першу чергу від габаритів ємності, температури та тиску при яких зберігається повітря [7].

Стандартна конструкція накопичувача енергії на стисненому повітрі складається з наступних елементів:

- двигун, що запускає компресор;
- багатоступінчастий компресор, який стискає повітря;
- ємність, у якій зберігається стиснене повітря;
- генератор, що перетворює механічну енергію у електричну енергію та повертає її назад у мережу;
- турбінний механізм, який вмикає турбіни високого та низького тисків.

Розглянемо принцип роботи за яким працюють накопичувачі на стисненому повітрі. У час надлишкової генерації потужності енергосистемою, електроенергія застосовується для двигуна, який приводить у дію компресор, що підвищує атмосферний тиск та перекачує його в замкнену ємність (резервуар). У період збільшення споживання електроенергії, стиснене повітря з резервуару потрапляє у турбіну високого тиску, яка надалі використовується для приводу електрогенератора.

Технології накопичувачів енергії на стисненому повітрі, у залежності від методів роботи з теплом, яке утворюється у наслідок стискання повітря розділяються на: ізотермічні, накопичення у вигляді рідкого повітря, діабатичні та адіабатичні.

У ізотермічній системі накопичення енергії на стисненому повітрі зменшена кількість етапів необхідних для нагрівання, охолодження, стиснення та розширення повітря. У цій технології використовується рідинний поршневий механізм, для стиснення повітря, замість турбіни та компресора. Ефективність стиснення повітря при цьому становить 95 %. Принцип роботи ізотермічної

технології полягає у тому, що тепло, яке утворюється під час стиснення повітря, використовується для нагрівання іншого потоку повітря перед його розрядженням. Це дозволяє зберігати температуру повітря під час заряджання, що сприяє підвищенню ефективності системи накопичення енергії.

Основною відмінністю технології накопичення, у вигляді рідкого повітря, є те що повітря зберігається не в газоподібному стані, а в рідкому. Зберігання рідкого повітря відбувається у спеціальних кріогенних камерах. Під час циклу розряджання повітря нагрівається та розширюється, надходячи до турбіни високого тиску, приводячи турбіну та генератор у роботу.

Для діабатичної технології накопичувачів притаманне нагрівання та стиснення повітря під час проходження його через компресор. Тепло, яке виділяється протягом стискання повітря відводиться завдяки використанню повітряного охолоджувача. За потреби, у виробництві електроенергії у камері згорання відбувається нагрівання стисненого повітря, яке приводить у дію турбіну та генератор.

У адіабатичній технології накопичення енергії тепло, яке утворюється на етапі стиснення повітря зберігається у спеціальному накопичувачі теплової енергії. Перед потраплянням стисненого повітря до турбіни, збережена теплова енергія підвищує температуру повітря, що зумовлює збільшення ККД системи [7].

Накопичувачі енергії на стисненому повітрі мають кілька переваг, зокрема, їх великий потенціал для зберігання великих обсягів енергії на тривалий термін. Вони можуть бути ефективним інструментом для зберігання електроенергії, отриманої з ВДЕ, таких як енергія сонцю та вітру, та використання її під час пікових навантажень. Однак такі накопичувачі мають недоліки, зокрема, втрати енергії під час процесу стиснення та розширення повітря.

1.2 Теплові системи накопичення енергії

Теплові системи накопичення енергії були розроблені, щоб зберегти енергію тепла методом нагрівання, випаровування, конденсації та охолодження речовини. Для зберігання матеріалів використовуються ізольовані сховища з контрольованим кліматом, де підтримується температура, що відповідає діапазону робочих температур цих матеріалів. Отримавши енергію з цих матеріалів її використовують для різних цілей будь-то промислові чи житлові застосування. Для прикладу, це може бути виробництво гарячої води, опалення або охолодження приміщень чи виробництво електроенергії.

Існують два типи теплових систем накопичення енергії:

- система низькотемпературного накопичення енергії, застосовує матеріали, температурний режим яких суттєво нижчий ніж температура навколишнього середовища;
- система високотемпературного накопичення енергії, використовує матеріали, робоча температура яких вища відносно температури навколишнє середовище.

На рисунку 1.3 зображено типи систем, що застосовуються для системи накопичення теплової енергії.

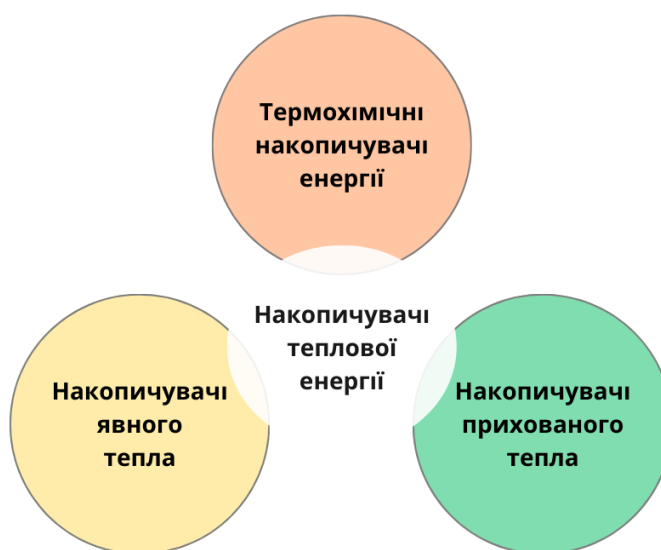


Рисунок 1.3 – Класифікація теплової системи накопичення енергії

1.2.1 Накопичувачі явного тепла

Накопичувачі явного тепла являються найпоширенішою системою накопичувачів теплової енергії. Накопичення тепла відбувається через збільшення температури рідкого чи твердого матеріалу без фазового переходу.

У залежності від стану матеріалу зберігання енергії накопичувачі явного тепла поділяються на два типи: явне акумулювання твердої речовини та явне акумулювання рідин (рис. 1.4).

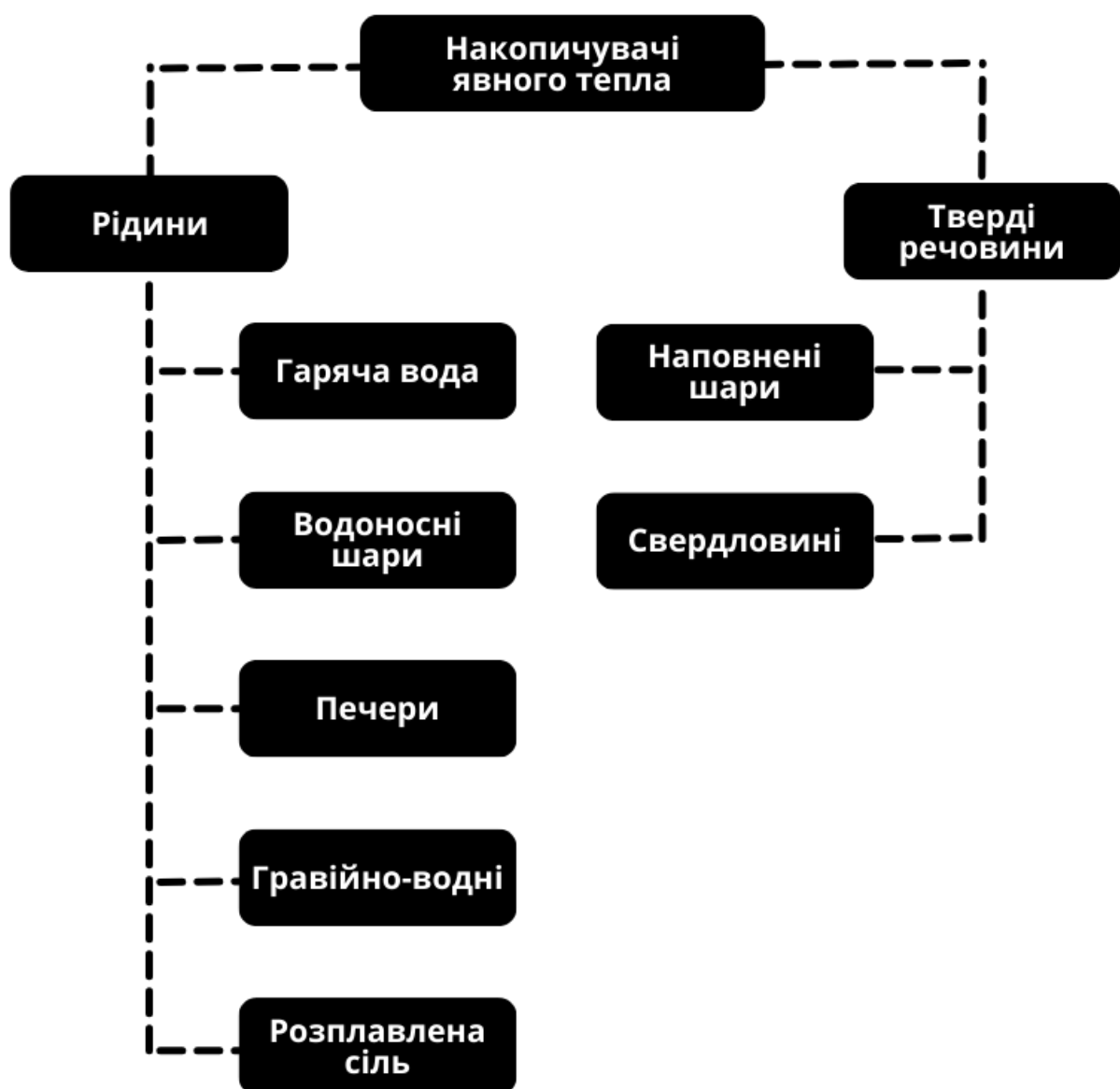


Рисунок 1.4 – Класифікація систем накопичення теплової енергії в залежності від агрегатного стану матеріалу

Накопичувачі теплової енергії гарячої води – це метод зберігання теплової енергії, шляхом нагрівання води до високої температури з подальшим зберіганням її в резервуарах. Резервуари з водою можуть бути на поверхні землі, частково або повністю закопані в землю. У якості матеріалу для акумулювання енергії застосовується вода, через її велику питому теплоємність. Час накопичення енергії та втрати на тепло залежать від ізоляції резервуару. Об'єм накопичення теплової енергії залежить від розміру резервуару та температури води. Вказані накопичувачі теплової енергії зберігають тепло при температурі 80-90 °C [8]. Накопичувачі теплової енергії гарячої води використовуються для забезпечення опалення та використання гарячої води в побуті, комерції та промисловості.

Водоносні шари використовуються для охолодження чи обігріву будівель, офісів, лікарень, торгових центрів у теплу чи холодну пору року. Літом будівлі охолоджуються підземними водами із шарів холодної води, а взимку обігріваються ґрунтовими водами із теплих шарів води. Система накопичення енергії водоносних шарів складається як мінімум з 2-х свердловин та теплового насосу. Відповідні колодязі поєднані між собою спеціальною петлею. Перевагою використання системи акумулювання теплової енергії водоносних шарів є: велика ємність накопичення, гнучкість розширення та невисока вартість будівництва.

Система печерних накопичувачів теплової енергії, у якості резервуару, застосовує природні чи штучні печери, проте для будівництва таких накопичувачів переважно використовують тунелі або покинуті шахти. Накопичення або використання теплової енергії відбувається за рахунок закачування чи викачування води з резервуару. Під час заряджання надлишок тепла що залишився, використовується з метою нагрівання води в накопичувачі. У ході циклу розряджання, гаряча вода забирається з верхньої частини резервуару та використовується для опалення будівель. Велика ємність накопичення теплової енергії вважається перевагою печерних накопичувачів, однак через високу вартість будівництва така система не набула широкого використання.

У виглядів накопичувача у гравійно-водній системі зберігання теплої енергії використовується виритий котлован, який закопаний у землі на глибині 5-15 м. Будівництво такої системи дешевше ніж будівництво великого водонакопичувача. Для середовища акумулювання тепла використовується суміш гравію та води. Максимальна температура зберігання становить 90 °С. Циркуляція води відбувається шляхом прямого водообміну або завдяки пластиковим трубам, які розташовуються на різних висотах накопичувача.

«Розплавлена сіль» - це рідина, яка утворена плавленням неорганічної солі. Система накопичення теплової енергії розплавленої солі класифікується на 2-ї групи: система прямого та непрямого накопичення [9]. Як теплоносій та теплозберігаюча рідина, у системі прямого накопичення, застосовується розплавлена сіль. Натомість система непрямого акумулювання використовує відокремлені дві ємності, одна для холодного, а інша для гарячого зберігання. Діапазон температур холодного резервуару рівний від 280 до 290 °С, а гарячого резервуару – 380-550 °С.

У системі накопичення теплової енергії з наповненим шаром кам'яні матеріали нещільно упаковані, що подібно до форми шару. При застосуванні входних та вихідних трубок відбувається передача теплової енергії до системи наповненого шару. У процесі заряджання, гаряче повітря з сонячного колектора подається через входну трубку до верху накопичувача, де передає теплову енергію каменю. При наявній різниці щільності, гаряче повітря охолоджується у сховищі наповненого кам'яного шару, далі повертається до колектора для наступного циклу. Коли відбувається процес розряджання (нічний період часу), холодне повітря з приміщення, із нижньої трубки, потрапляє до резервуара з наповненим шаром забираючи при цьому накопичену теплову енергію кам'яного шару. Нагріте повітря потрапляє у приміщення через верхню трубку. ККД системи наповненого шару на 60% менший ніж системи на водній основі, але витрати на будівництво зазначеної системи відчутно менші.

Свердловинна система накопичення теплової енергії являється підземною структурою, яка акумулює великий об'єм сонячного тепла, що в більшості

збирається влітку, щоб використати його в холодну пору року. Основними елементами такої конструкції є свердловини, що призначені для теплового обміну. Свердловини розташовуються близько одна від одної. Діаметр свердловин становить 100-150 мм, розташовуються вони на глибині від 30 до 200 м [10, 11]. Протягом циклу заряджання, потік у свердловинах циркулює від центру до границь накопичувача. Цей рух викликає збільшення температури в центрі накопичувача та зниження на границях. Під час циклу розряджання потік змінює свій напрямок. Улітку тепла рідина прокачується через свердловинні теплообмінники, де вона віддає надлишок тепла ґрунту, що зберігається протягом тривалого часу. Взимку нагріте тепло повертається знову через теплообмінники та може бути застосоване, наприклад, для опалення будівель. Будівництво вище зазначеної системи є найдорожчим серед підземних систем накопичення теплової енергії по причині того що необхідне буріння глибоких свердловин.

1.2.2 Накопичення прихованого тепла

Система накопичення прихованого тепла побудована за таким принципом, що під час зміни фази накопичувального матеріалу виділяється чи поглинається тепло, яке надалі використовується для різних цілей. Продуктивність такої системи в більшості залежить від здатності накопичувального матеріалу при сталій температурі змінювати свій агрегатний стан.

Зазначена система класифікується за двома параметрами (рис. 1.5): використаний матеріал накопичення та тип зміни фази. У залежності від фазового переходу можливі наступні форми: тверде тіло-газ, тверде тіло-тверде тіло, рідина-газ і тверде тіло-рідина. Система накопичення прихованого тепла з переходом між твердими тілами використовує зміну кристалічної структури матеріалу для зберігання теплової енергії. Відповідна зміна фази матеріалу характеризується малою кількістю прихованої теплоти та незначними змінами об'єму. Найбільше прихованої теплоти спостерігається при фазовому переході рідина-газ та тверде тіло-газ, проте об'єм під час таких переходів дуже великий,

що унеможлиблює його стримування. Фазові переходи тверде тіло-рідина найбільш застосовані в системах накопичення прихованого тепла, через те що вони мають несуттєве зміння об'єму - до 10% порівнюючи з вище вказаними фазовими переходами, але прихована теплота таких переходів звісно менша.

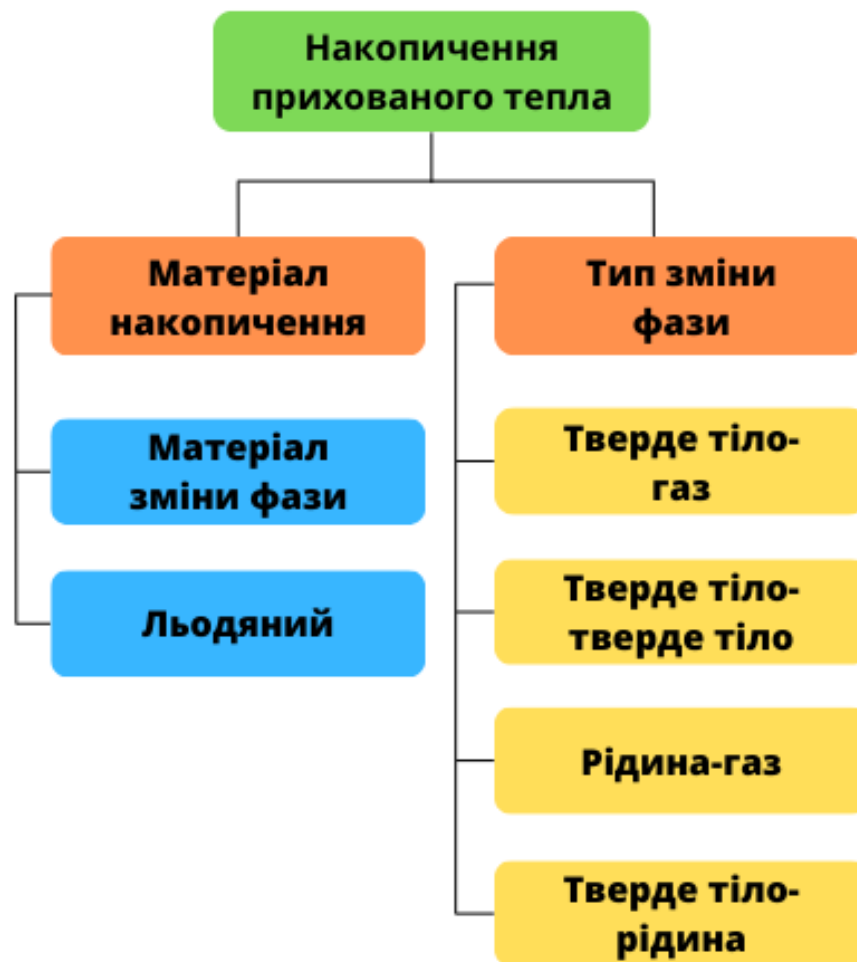


Рисунок 1.5 – Класифікація системи накопичення прихованого тепла

На рисунку 1.6 можна спостерігати профіль фазового переходу, для матеріалу, що використовується у вигляді накопичувача під час додавання або відведення від нього тепла. З відповідного рисунку видно, що при взаємодії з тепловою енергією відбувається збільшення температури чи зміна його фази матеріалу.

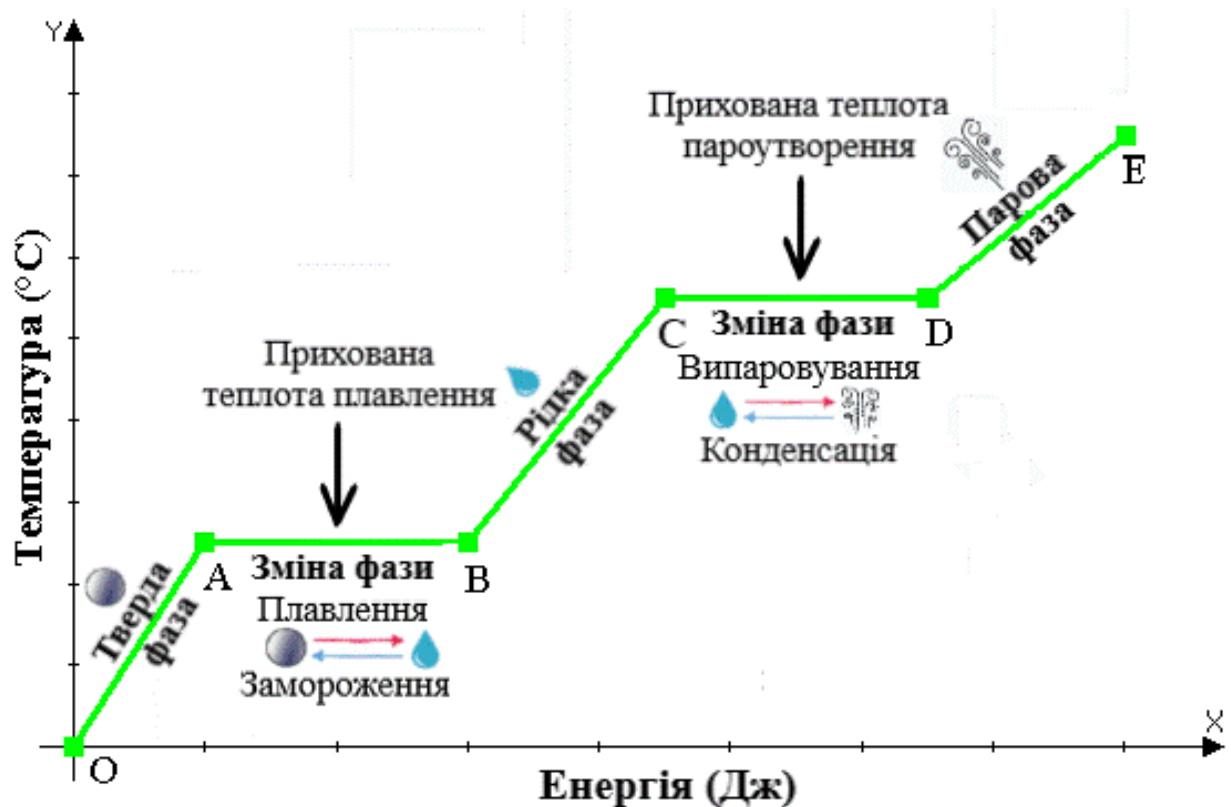


Рисунок 1.6 – Діаграма нагрівання та охолодження накопичувального матеріалу

Точка О показує матеріал, що знаходиться у твердій фазі. В області О-А відображається нагрівання твердої речовини при додаванні теплової енергії. При досяганні певної температури відбувається процес плавлення, після якого матеріал переходить у рідку фазу (А-В). У період цього переходу, тепла енергія, що поглинається, є прихованою теплою плавлення. Область В-С відображає нагрівання рідини до температури випаровування, рідина переходить у фазу випаровування (С-D). Таке поглинання теплоти має назву прихованої теплоти пароутворення. D-E являється областю суттєвого підвищення температури пари.

1.2.3 Термохімічне накопичення енергії

Система термохімічного накопичення теплової енергії – це така система, у якій накопичення відбувається у непрямий спосіб. Тобто тепло поглинається та виділяється безпосередньо під час дисоціації/асоціації молекулярних зв'язків у

оборотній хімічній реакції [12]. Накопичення теплової енергії у вказаній системі відбувається шляхом застосування ентальпії реакції ΔH .

Основними показниками від яких залежить кількість накопиченої теплової енергії вважаються: ступінь перетворення, ентальпія реакції, тип та кількість матеріалу. Обираючи термохімічний матеріал для системи накопичення, обов'язково потрібно враховувати температуру реакції та величину їх щільності енергії. У таблиці 1.1 наведені термохімічні матеріали, які в теперішній час є найперспективнішими для термохімічних систем накопичення енергії.

Таблиця 1.1 – Перелік термохімічних матеріалів

Термохімічний матеріал	Температура реакції заряджання (°C)	Щільність зберігання енергії (ГДж·м ⁻³)
Кальцію карбонат (CaCO ₃)	837	3.3
Епсоміт (MgSO ₄ ·7H ₂ O)	122	2.8
Гідроксид заліза (Fe(OH) ₂)	150	2.2
Сульфат кальцію дигідрат (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	89	1.4
Карбонат заліза (FeCO ₃)	180	2.6

Термохімічні накопичувачі поділяються на 2 типи (рис. 1.7): відкриті та закриті. Розглядаючи відкриту систему накопичення, робоча рідина в основному знаходиться у газоподібному стані. При потраплянні такої рідини в зовнішнє середовище відбувається вивільнення ентропії. У замкненій системі робоча ентропія вивільняється у зовнішнє середовище завдяки використанню зовнішнього інтерфейсу теплообмінника.

До переваг застосування системи термохімічного накопичення енергії відноситься:

- широкий діапазон робочих температур;
- мінімальні теплові втрати;
- висока щільність енергії.

Єдиним недоліком такої системи є складність конструкції. Наразі проводяться нові розробки, щоб спростити будову такої системи [13].

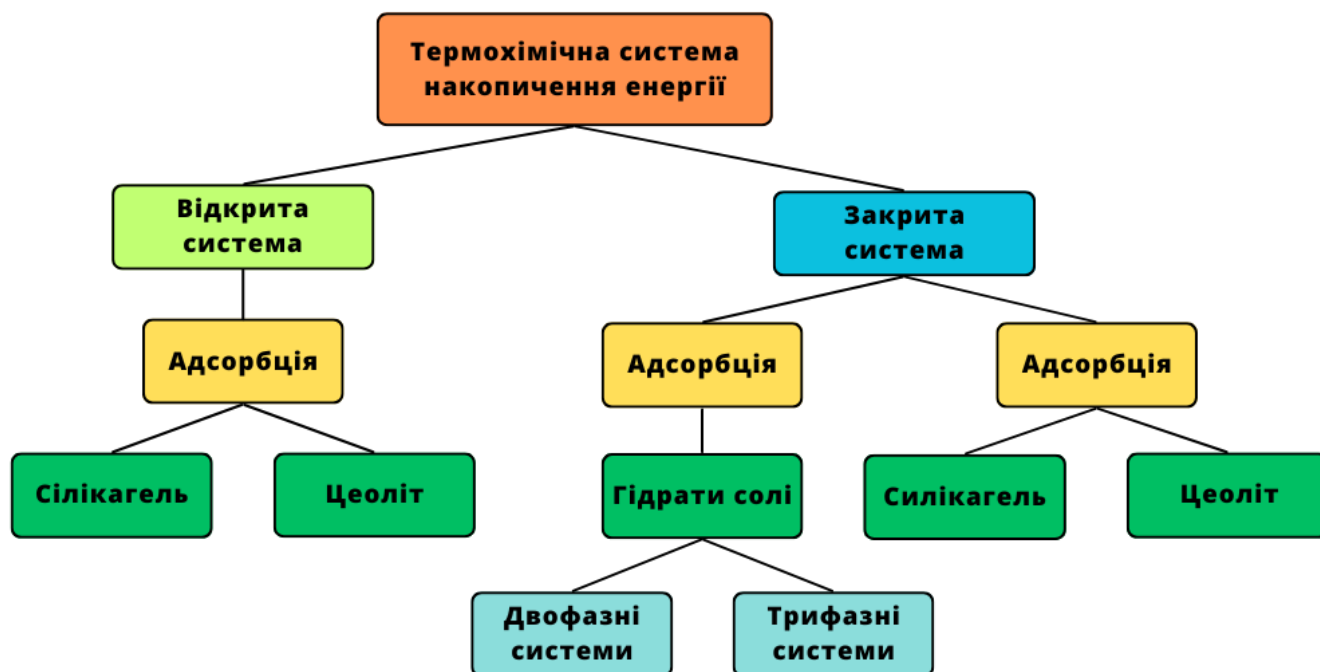


Рисунок 1.7 – Класифікація термохімічних систем накопичення теплової енергії

1.3 Хімічні системи накопичення енергії

На сьогоднішній день хімічне паливо є основним джерелом енергії у транспортній та енергетичній сферах. Серед найпоширеніших видів хімічного палива можна відзначити: вугілля, бензин, водень, природний газ, скраплений нафтовий газ, дизельне паливо, етанол тощо.

Система накопичення хімічної енергії у більшості використовується для тривалого акумулювання хімічної енергії. Це системи, які використовують хімічні реакції, для зберігання та вивільнення енергії у вигляді хімічних зв'язків між молекулами та атомами. Під час виділення енергії в хімічних системах, склад матеріалів може змінюватися, через хімічні реакції які відбуваються. У вихідних матеріалах розриваються хімічні зв'язки, в результаті чого відбувається виділення енергії. Як наслідок розвитку нових хімічних зв'язків, утворюються

нові речовини або продукти реакції. Серед основних хімічних систем накопичення енергії виділяють:

- синтетичний природний газ;
- сонячне паливо;
- система акумулювання водню.

1.3.1 Накопичення хімічної енергії на синтетичному природньому газі

Синтетичний природний газ (СПГ) – це газ, який створений штучним методом. Синтетичний газ виробляється із різних матеріалів таких як вугілля, нафта та біомаса. Під час проведення дослідження було доведено, що використання вугілля, як матеріалу для виробництва штучного газу, є ефективною альтернативою для виробництва енергії [14]. Щоб зберігати СПГ використовуються резервуари під тиском, підземні печери тощо.

Останнім часом були створені нові технології термічної газифікації, які забезпечують виробництво синтетичного природного газу з вугілля та сухої біомаси. Для отримання СПГ з вугілля та твердої сухої біомаси, такої як деревина чи солома, застосовується термохімічний процес, який передбачає проведення декількох етапів конверсії (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Етапи виробництва синтетичного природнього газу

1.3.2 Накопичення хімічної енергії за допомогою сонячної енергії

Сонячним паливом називають хімічне паливо, що акумулює енергію одержану від сонця. Енергію сонця накопичують з метою збереження її у хімічних зв'язках палива та послідовному використанні її для необхідних цілей.

На тепер ученими зі всього світу проводяться дослідження 3-х підходів для виробництва сонячного палива: термохімічне виробництво, штучний природний та штучний фотосинтез [15].

Термохімічний підхід базується на використанні сонячної енергії, для нагрівання речовин до дуже високих температур. При таких умовах відбувається їх реакція з водяною парою або діоксидом вуглецю (CO_2), що призводить до утворення водню (H_2) чи монооксиду вуглецю (CO).

Природний фотосинтез – це процес перетворення сонячної енергії у сонячне паливо. Рослини, морські водорості та окремі бактерії, поглинаючи сонячну енергію, зберігають її у вигляді вуглеводів. Вуглеводи слугують ключовим джерелом енергії для рослин, що підтримує їх життєдіяльність. Завдяки їм відбуваються такі важливі процеси як ріст, розвиток, репродукція та фотосинтез.

Процес перетворення сонячної енергії на паливо в штучному фотосинтезі імітує природний фотосинтез. Завдяки використанню спеціальних технологій, сонячне світло поглинається, а отримана енергія використовується для хімічного перетворення води та вуглекислого газу на сонячне паливо.

1.3.3 Накопичення хімічної енергії завдяки використанню водню

Водень є ідеальним енергоносієм, оскільки він представляє собою чистий і безвідходний хімічний елемент. Тобто його використання не супроводжується викидами вуглецю або іншими забруднювачами. Водень можна отримати з води двома основними методами: електролізом, коли вода розщеплюється на водень та кисень за допомогою електричного струму, або відразу з сонячного світла, використовуючи процес фотокаталітичного розщеплення води.

Система на основі водневої енергії складається з 3-х ключових компонентів:

- блок генерації водню, зазвичай представлений електролізером, перетворює електричну енергію на водень;

- система зберігання водню: призначена для безпечного та надійного зберігання водню, виробленого на попередньому етапі;
- блок конверсії енергії водню – це паливний елемент або регенератор паливного елементу, використовує накопичену хімічну енергію водню для її повторного перетворення у електричну енергію, до складу якого входить катод, анод, електроліт і зовнішній контур.

У час відсутності пікового навантаження, надлишкова електроенергія може бути використана для виробництва водню з води за допомогою процесу електролізу. Отриманий водень зберігається у спеціальних резервуарах. Під час циклу розрядки, яка відбувається у період пікових годин, водень з резервуарів використовується як паливо для паливних елементів, що генерують електроенергію.

Переваги:

- екологічність;
- гнучкість;
- довговічність.

Недоліки:

- вартість будівництва;
- інфраструктурні обмеження.

1.4 Електричні системи накопичення енергії

Електричні системи накопичення енергії (ЕСНЕ) відіграють важливу роль у сучасній енергетиці, адже вони дають змогу зберігати електроенергію без її втрат та перетворення на інші форми, що робить їх незамінними для багатьох сфер, таких як: відновлювана енергетика, електромережі, резервне живлення тощо.

Існують два основних типи ЕСНЕ:

- магнітні системи накопичення енергії, зберігають енергію у вигляді магнітного поля у надпровідних магнітах, мають більшу ємність, у порівнянні з

електростатичними системами, проте вони мають меншу швидкість заряджання та розряджання;

– електростатичні системи накопичення енергії, зберігають енергію у вигляді електричного поля у конденсаторах та суперконденсаторах, ємність накопичення у них обмежена, але головною їх перевагою є висока швидкість заряджання та розряджання.

На рисунку 1.9 зображена класифікація електричних систем накопичення енергії.

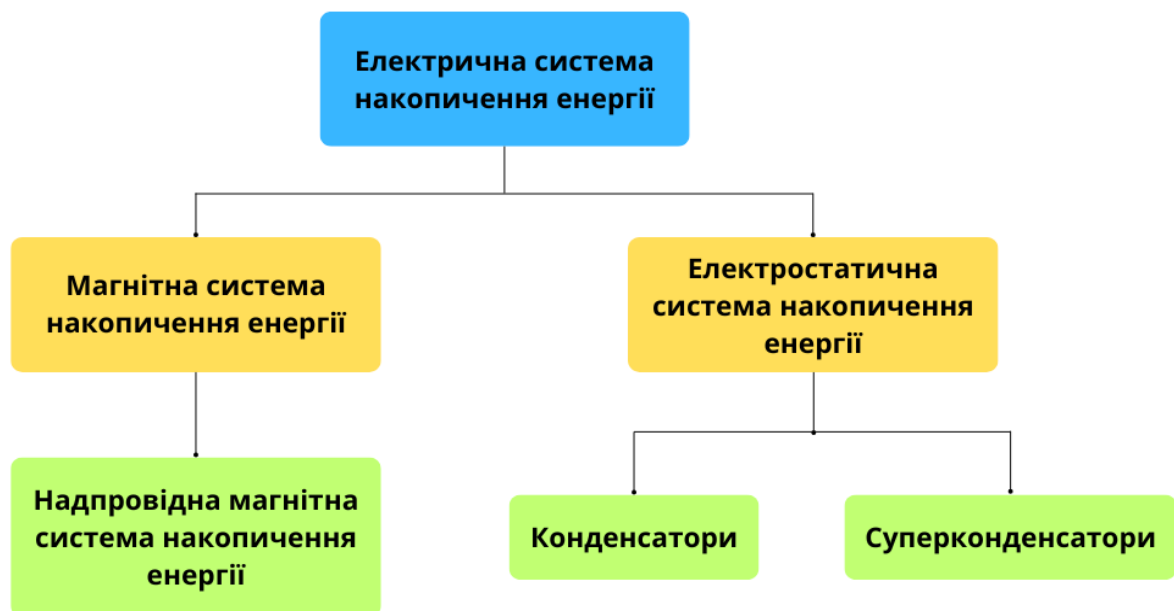


Рисунок 1.9 – Класифікація електричної системи накопичення енергії

1.4.1 Надпровідна магнітна система накопичення енергії

Надпровідна магнітна система накопичення енергії – це новий метод акумулювання енергії, який використовує надпровідний матеріал (катушка) для створення потужного магнітного поля. До складу такої системи входять: холодильник, надпровідні котушки, система перетворення та керування живленням.

Система охолодження призначена для підтримування низьких температур надпровідного матеріалу. Підтримування низької температури

котушки необхідне, щоб надпровідний матеріал не втратив свої властивості. Коли відбувається цикл заряджання, потік струму в котушці зростає, а під час процесу розряджання навпаки – зменшується. Для перетворення змінного струму у постійний та навпаки призначена система перетворення живлення. Під час циклу заряджання та розряджання система керування електричною енергією регулює живлення надпровідної системи накопичення магнітної енергії.

Зазначена система накопичення енергії має ряд переваг:

- велика ємність;
- високий ККД – 85-90 %;
- тривалий термін зберігання накопиченої енергії.

Недоліками такої системи вважаються:

- великі габарити та вага;
- висока вартість будівництва.

1.4.2 Конденсатори - накопичувачі електричної енергії

Конденсатор – це пристрій, який накопичує електричну енергію завдяки електростатичному полю, енергія накопичується у вигляді електричного заряду на пластинах конденсатора. Основні елементи конденсатора: дві металеві пластини, що розділені діелектричним матеріалом (папір, повітря, пластик, кераміка).

Конденсатори дещо схожі до акумуляторних батарей, вони також накопичують електроенергію під час приєднання до мережі, проте накопичення електричної енергії у них відбувається без електрохімічних процесів, що надає змогу з більшою швидкістю видавати енергію.

Накопичувальна ємність конденсатора залежить від розмірів та форми провідних пластин, а також від відстані між пластинами.

У таблиці 1.2 представлені приклади широко використовуваних електростатичних конденсаторів та їхні характеристики.

Позитивні аспекти використання електростатичних конденсаторів як накопичувачів електроенергії:

- швидкий процес заряджання та розряджання;
- простота конструкції;
- довгий термін експлуатації;
- широкий діапазон робочих температур.

Негативні аспекти:

- чутливість до перенапруг;
- низька щільність енергії;
- невелика ємність.

Таблиця 1.2 – Електростатичні конденсатори та їхні характеристики [9]

Тип	Матеріал електродів	Діелектричний матеріал	Напруга (кВ)	Ємність (мкФ)
Керамічні	Метал	Кераміка	0.016 - 15	$1 \cdot 10^{-5}$ - 100
Алюмінієво електrolітичні	Алюмінієва фольга	Оксид алюмінію	0,004 - 0,63	$0.1 - 2.7 \cdot 10^6$
Танталові	Тантал	Оксид танталу	0.002 – 0.5	0.001 - 72
Паперові	Алюміній	Папір просочений воском	до 2	0.001 - 2
Плівкові	Алюмінієва фольга	Поліетиленова плівка	0.05 - 2	0.001 - 30

1.4.3 Суперконденсатори

Суперконденсатори – це електричні пристрої, які часто також називають двошаровими конденсаторами, тому що вони складаються з 2-х електродів-провідників, які розміщуються у електролітичному розчині та розділені сепаратором (діелектричний матеріал).

Суперконденсатори так як і конденсатори зберігають накопичену енергію у вигляді електростатичного поля. Відповідне електростатичне поле створюється завдяки використанню напруги постійного струму, яка прикладається до двох електродів.

Два електроди забезпечують значну площу поверхні для зберігання електричного заряду. Електроліт у якому розміщуються електроди, зазвичай представлений у вигляді рідини або гелю. Сепаратор відокремлює електроди один від одного, забезпечуючи цим транспорт іонів між електродами, одночасно запобігаючи прямому потоку електронів. При подачі напруги на електроди, іони з електроліту притягуються до поверхні кожного електрода, позитивні іони рухаються до негативного електрода, тоді як негативні іони рухаються до позитивного електрода. Вказаний процес генерує подвійний шар заряду на кожному розділі електрод-електроліт. Подвійний шар має здатність накопичувати значну кількість заряду, що дозволяє суперконденсаторам досягати високої щільності енергії у порівнянні зі звичайними конденсаторами.

У порівнянні з акумуляторними батареями, у яких відбувається хімічні реакції для виробництва електроенергії, суперконденсатори швидко видають потрібну енергію.

Використання суперконденсаторів дуже розповсюджене. У теперішній час вони застосовуються у: військовій техніці, аерокосмічній галузі, електромобілях, гібридних авто, поїздах, автобусах, електроніці, телекомунікації тощо.

Суперконденсатори мають ряд переваг: висока щільність потужності, забезпечуючи швидку передачу енергії, потрібну для таких цілей, як рекуперативне гальмування; тривалий термін служби, здатний витримувати сотні тисяч циклів заряду та розряду з мінімальним погіршенням продуктивності, тим самим зменшуючи вимоги до обслуговування; широкий діапазон робочих температур; висока ефективність, ККД - 95-98%. Проте суперконденсатори також мають недоліки: нижчу щільність енергії порівняно з батареями, що обмежує їх здатність накопичувати енергію протягом тривалого періоду часу; обмеження напруги, які вимагають кількох елементів або додаткових компонентів для високовольтичних застосувань; відносно високі показники саморозряду, виникають під час того коли суперконденсатор не використовується; вища початкова вартість, ніж традиційних акумуляторних батарей.

Отже, суперконденсатори, як накопичувачі електроенергії мають великий потенціал для задоволення різноманітних потреб. Їхні унікальні властивості роблять їх цінним доповненням до традиційних акумуляторних батарей, забезпечуючи довговічність, безпечну роботу, швидке накопичення та вивільнення енергії.

1.5 Електрохімічні системи накопичення енергії

Електрохімічні системи накопичення енергії – це системи накопичення енергії, які акумулюють енергію за рахунок електрохімічних процесів, що відбуваються в них.

Існує декілька типів таких систем, проте їх прийнято розділяти на два основні:

- акумуляторна система накопичення енергії;
- накопичення енергії в проточних акумуляторах.

У акумуляторній системі накопичений заряд акумулюється всередині електродів, а у проточних акумуляторах він спочатку зберігається у вигляді палива, яке у процесі розрядження подається на поверхню електродів [9].

На рисунку 1.10 зображена класифікація електрохімічної системи накопичення енергії.



Рисунок 1.10 – Структура електрохімічної системи накопичення енергії

1.5.1 Акумуляторна система накопичення енергії

1.5.1.1 Свинцево-кислотні акумулятори

Свинцево-кислотні акумулятори (Lead-acid battery) – це один із найрозповсюдженіших типів акумуляторних батарей, які зараз використовуються для систем накопичення енергії. Цю технологію акумуляування електричної енергії було винайдено в 1859 році.

Конструкція свинцево-кислотного акумулятора нескладна, до її складу входить: два електроди (анод і катод), електроліт та відокремлювач. Металевий губчастий анод та катод (виготовлений з оксиду свинцю) розташовані в електроліті, який складається з 63 % дистильованої води та 37 % сірчаної кислоти. Пористий сепаратор виконує функцію відокремлювача: унеможливорює прямий потік електронів від анода до катода [16].

Принцип роботи свинцево-кислотного акумулятора полягає у хімічних реакціях між свинцевим і свинцево-діоксидним електродами в сірчано-кислотному електроліті. Під час розрядження свинець на аноді перетворюється на сульфат свинцю, тоді як діоксид свинцю на катоді перетворюється на сульфат свинцю. Під час циклу заряджання ці процеси повертаються у початковий стан.

Свинцево-кислотні акумулятори класифікуються на два типи: WET та VRLA (Valve Regulated Lead Acid) акумулятори [5].

WET акумулятори, у перекладі на українську, означає «вологі» акумулятори. У відповідному типі акумуляторів електроліт знаходиться у рідкому стані, тобто він вільно рухається між пластинами акумулятора. WET акумулятори бувають обслуговуванні, у яких потрібен контроль рівню електроліту, та необслуговувані – герметичні акумулятори. Вказані акумулятори в основному використовуються для запуску двигунів внутрішнього згорання, інколи можуть бути застосовані для джерела безперебійного живлення (ДБЖ).

VRLA акумулятори – це свинцево-кислотні акумулятори з клапанним регулюванням або також їх часто називають герметичними акумуляторами. Зазначені акумулятори не потребують обслуговування. Клапан у VRLA акумуляторах призначений для «скидання» надлишкового тиску, який може утворитись всередині акумулятора в результаті його перезаряджання.

VRLA акумулятори поділяються на AGM та GEL акумулятори.

AGM (Absorbent Glass Mat) акумулятор у якому електроліт поглинається абсорбуючим скломатом, який розташовується всередині між пластинами акумуляторної батареї. AGM знайшли своє використання серед багатьох напрямків: автомобілі, електромобілі, велосипеди, мотоцикли, морський транспорт, ВДЕ, електронні системи, ДБЖ, аварійне живлення.

Відмінність GEL акумулятора від AGM полягає у тому, що в GEL акумуляторі електроліт знаходиться в загущеній гелеподібній формі. GEL акумулятор стійкий до вібрацій та має підвищений клас безпеки. Його можна розташовувати в будь-якому положенні, так як електроліт не зможе витекти. GEL акумулятори використовуються для: електричних транспортних засобів,

систем безперебійного живлення, системи енергозбереження, телекомунікацій, медичного обладнання тощо.

Розглянувши свинцево-кислотні акумулятори визначимо їхні переваги та недоліки для електрохімічних систем накопичення енергії.

Позитивні сторони:

- дешевизна;
- простота конструкції;
- велика потужність;
- хороша продуктивність при аномальних температурах;
- доступність у різних розмірах.

Негативні сторони:

- невелика кількість циклів заряд-розряд;
- швидкий саморозряд;
- малий термін експлуатації;
- повільна зарядка;
- необхідність зберігати акумулятор у зарядженому стані.

1.5.1.2 Нікель-метал-гідридні Ni-Mh акумулятори

Нікель-метал-гідридний акумулятор Ni-Mh – це акумулятор, який широко використовується в побуті. Нікель-метал-гідридний акумулятор класифікується як лужний акумулятор. Складається він з: аноду (негативний електрод), що містить у своєму складі гідроксид нікелю (Ni(OH)_2); катоду (позитивний електрод), що складається зі сплаву, який поглинає водень; сепаратору з тонких волокон, що розділяє електроди один від одного та забезпечує передачу електронів та іонів; електроліту, який складається з водного гідроксиду калію (KOH); металевого корпусу; виводів.

Під час заряджання Ni-Mh акумулятора відбувається подвійна реакція: на позитивному електроді нікель-гідроксид (Ni(OH)_2) перетворюється на оксид-гідроксид нікелю (NiOOH), а на негативному електроді вода електролізується та

поглинає на своїй поверхні водень, утворюючи при цьому гідрат. Процес розрядження Ni-Mh акумулятора обернений до процесу заряджання.

За формую та розмірами нікель-метал-гідридні акумулятори класифікують на 3-и групи: призматичні, циліндричні та кнопкові. Найбільше використовуються наступні типи Ni-Mh акумуляторів: А, АА, ААА, С, D та F.

Використання Ni-Mh акумуляторів різноманітне. Ось деякі приклади де застосовуються ці акумулятори: електроніка - мобільні телефони, цифрові фотоапарати, MP3-плеєри, портативні миші, ноутбуки, відеокамери; електричні інструменти – шуруповерти, викрутки, пилки; накопичувачі енергії ВДЕ; медичне обладнання – хірургічні інструменти, переносні діагностичні пристрої, слухові апарати.

Визначимо переваги Ni-Mh акумуляторів:

- довговічність, можливість заряджання та розряджання великої кількості разів;
- можливість утилізації;
- швидкий процес заряджання;
- стійкі до низьких температур, можливість використання при температурі – 20 °C;
- невисока вартість.

Основні недоліки Ni-Mh акумуляторів:

- обмежений струм розряджання, надмірні розряджання акумулятори за високих струмів призводять до скорочення терміну експлуатації;
- високий саморозряд;
- чутливість до високих температур, у разі неправильного заряджання акумулятора може значно підвищитись його температура, що призведе до виходу з ладу.

1.5.1.3 Літій-іоні Li-ion акумулятори

Англійський хімік Стенлі Віттінгем у 1970-х роках представив концепцію Li-ion акумуляторів. Вчений запропонував нову концепцію інтеркаляційних електродів, де катодом слугує дисульфід титану, а анодом – металевий літій [9].

Літій-іонний акумулятор складається з кількох основних елементів:

- анод, зазвичай виготовляється з графітового вуглецю;
- катод, виготовляється з оксиду металу літію, наприклад, оксиду марганцю літію (LiMn_2O_4) або нікель-кобальто-марганцевого оксиду літію (LiNiMnCoO_2);
- електроліт, неорганічна розчинена сіль літію, яка забезпечує рух іонів літію між анодом і катодом;
- сепаратор, ізолює анод від катода, проте дозволяє іонам літію проходити через електроліт;
- система захисту, запобігає перегріву, короткому замиканню, перенапрузі та перевантаженню.

Будова Li-ion акумулятора та принцип його дії зображена на рисунку 1.11.

Літій-іонні акумулятори працюють шляхом переміщення іонів літію між анодом і катодом під час процесів заряджання та розряджання. Під час заряджання зовнішня енергія змушує іони літію виходити з катода та крізь електроліт проникати в анод. Процес розряджання відбувається в зворотному напрямку, так як іони повертаються до катода, вивільняючи захоплені електрони.

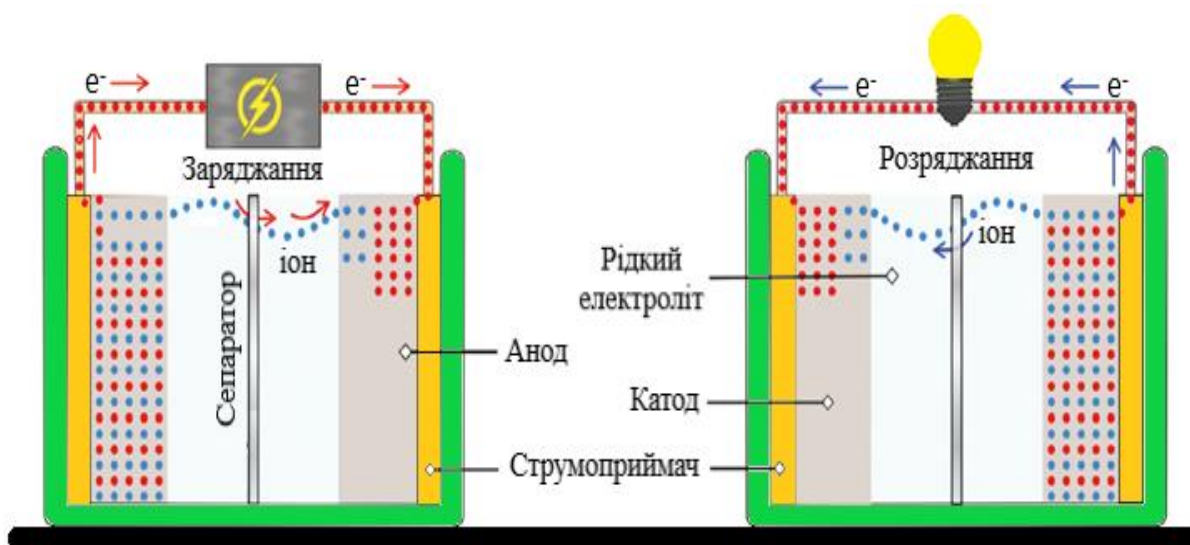


Рисунок 1.11 – Будова та принцип роботи Li-ion акумулятора [9]

Наразі літій-іонні акумулятори дуже розповсюджені для використання у сучасному світі. Li-ion акумулятори знайшли своє застосування в:

- електричних інструментах (пилососи, шуруповерти, болгарки, лобзики, викрутки, рівні, електропили, тримери);
- електроніці (радіокеровані моделі, пульти керування, радіо, мобільні пристрої, навушники, калькулятори, MP3 плеєри, фотоапарати, відеокамери, портативні колонки, системи GPS, робототехніка, ваги, годинники, ноутбуки, комп'ютерні миші, смарт годинники, ДБЖ);
- електротранспорті (трамваї, гібридні авто, електричні авто, електроскутери, електровелосипеди, електросамокати);
- альтернативних джерелах живлення;
- накопичувачах енергії для ВДЕ (ВЕС та СЕС);
- медицині (дефібрилятори, слухові апарати, монітори пацієнтів, інфузійні насоси, кардіостимулятори).

У таблиці 1.3 визначені переваги та недоліки використання Li-ion акумуляторів для СНЕ.

Таблиця 1.3 – Переваги та недоліки літій-іонних акумуляторів

Переваги	Недоліки
1. Велика щільність енергії	1. Необхідність у правилах при перевезенні значної кількості
2. Відсутність ефекту пам'яті	2. Пожежонебезпечні
3. Тривалий термін експлуатації	3. Висока вартість виробництва
4. Висока навантажувальна здатність	4. Чутливість до високих температур
5. Високий ККД	5. Потреба у системі захисту
6. Відсутність додаткового обслуговування	
7. Невелика вага	

1.5.1.4 Літій-полімерні Li-Pol акумулятори

Вперше літій-полімерні акумулятори були застосовані в мобільних телефонах у 1999 році компанією Ericsson [17]. Так як розмір Li-pol акумуляторів був маленьким, це спричинило різке зростання популяризації відповідних акумуляторів.

Літій-полімерний акумулятор за конструкцією дуже подібний до Li-ion акумулятора. Комірки Li-pol акумулятора по формі являють собою тонкі плоскі пакетики з алюмінієвої фольги. Виготовлення корпусів для комірок Li-pol акумулятора значно дешевше ніж для Li-ion батарей. Крім того вага таких корпусів буде меншою. Діапазон комірок для літій-полімерних акумуляторів масштабний, їх можливо виготовляти у великих розмірах та малих – товщиною менше одного міліметра.

Складається Li-pol акумулятор з: негативно зарядженого електроду – аноду; позитивно зарядженого електроду – катоду; електроліту; сепаратору. Анод виготовляється з графіту та добавок. У конструкції акумулятора він приклеєний до металевої підкладки. Катод виробляється з оксиду металу літію – оксиду літію-кобальту (LiCoO_2) чи оксиду марганцю літію (LiMn_2O_4), крім того можлива їхня суміш. Позитивний електрод так само як і негативний приклеєний

до металевої підкладки. Для електроліту найчастіше використовується провідна сіль - гексафторфосфат літію (LiPF_6).

Анод і катод використовують дефлектори, які намотуються навколо серцевини разом з відокремлювачем. Дефлектори виготовляються з тришарового поліолефіну. Щоб створити прямокутну обмотку серцевина виготовляється з плоского стрижня. За допомогою зварювання корпусу комірки утворюється ущільнення.

Принцип роботи літій-полімерного акумулятора ґрунтується на циклічному процесі впровадження (інтеркаляції) іонів літію в кристалічну структуру негативного електрода на основі графіту під час зарядки, та їх виведення (деінтеркаляції) з неї при розрядці з матеріалу позитивного електрода, у результаті товщина комірки зменшується, тобто повертається в початковий стан [18].

Щільність енергії Li-pol акумуляторів більша ніж у Li-ion, якщо мова йде про відношення ваги цих акумуляторів. Щоб збільшити ємність Li-pol батареї її слід з'єднати паралельно.

Існують різні форми літій-полімерних акумуляторів, серед яких: круглі, прямокутні, надтонкі, п'ятикутні, вигнуті та циліндричні.

Робота Li-pol акумуляторів неможлива без застосування захисної системи РСМ, яка керує живленням акумуляторної батареї. Модуль керування живленням РСМ розриває електричне коло у разі:

- перевищення максимального навантаження;
- перевищення напруги заряджання та розряджання;
- виникнення короткого замикання.

Середнє значення напруги однієї комірки Li-pol акумулятора рівне 3.7 В, отже для досягнення необхідної напруги ці комірки потрібно з'єднувати послідовно. Щоб напруга та струм комірок Li-pol акумулятора були урівноважені, для цього використовується система керування акумулятором – BMS. Застосування цієї системи забезпечує одночасне рівномірне заряджання усіх комірок батареї, що зумовлює триваліший термін експлуатації батареї.

Впровадження літій-полімерних акумуляторів призвело до виробництва тонких та легких смартфонів, ноутбуків, навушників, планшетів, систем навігації тощо.

Тепер Li-pol акумулятори застосовуються у багатьох галузях: транспорт – електровелосипеди, гібридні авто, гіроскутери, деякі електромобілі; електронні пристрої – мобільні телефони, квадрокоптери, радіоприймачі, комп’ютерні миші, акустичні системи, фітнес-браслети, зовнішні накопичувачі; медичне обладнання – тонометри, інфузійні насоси, пульсоксиметри, дефібрилятори.

Визначимо, які є переваги та недоліки у Li-pol акумуляторів.

Переваги:

- габарити, Li-pol акумулятори є дуже тонкими, що надає можливість використовувати їх у малих пристроях;
- по відношенню ваги та потужності літій-полімерні акумулятори легші за літій-іоні;
- повільний саморозряд;
- широкий температурний режим використання, від -20°C до $+60^{\circ}\text{C}$;
- збільшена кількість циклів заряд-розряд, у середньому 300-500 циклів, у Li-ion від 200 циклів до 300 циклів.

Недоліки:

- необхідність системи захисту;
- потреба у використанні системи керування акумулятором;
- вартість виробництва більші ніж у Li-ion акумуляторів;
- вибухо- та пожежонебезпечні;
- токсичність, якщо акумулятор буде пошкоджено через необережність, то існує ймовірність виділення токсичних речовин, які є шкідливими для навколишнього середовища та людини.

У висновку можна зазначити, що Li-pol акумулятори є ефективним рішенням у випадках де необхідне живлення протягом довгого періоду та існує потреба у використанні різних форм та розмірів акумуляторних батарей, а також необхідність у заощадженні на вазі акумулятора.

1.5.1.5 Літій-залізо фосфатні LiFePO_4 акумулятори

Літій-залізо-фосфатні акумулятори також відомі як LiFePO_4 або LFP є одними із найсучасніших існуючих типів акумуляторних батарей. Конструкція LiFePO_4 акумулятора зображена на рисунку 1.12.

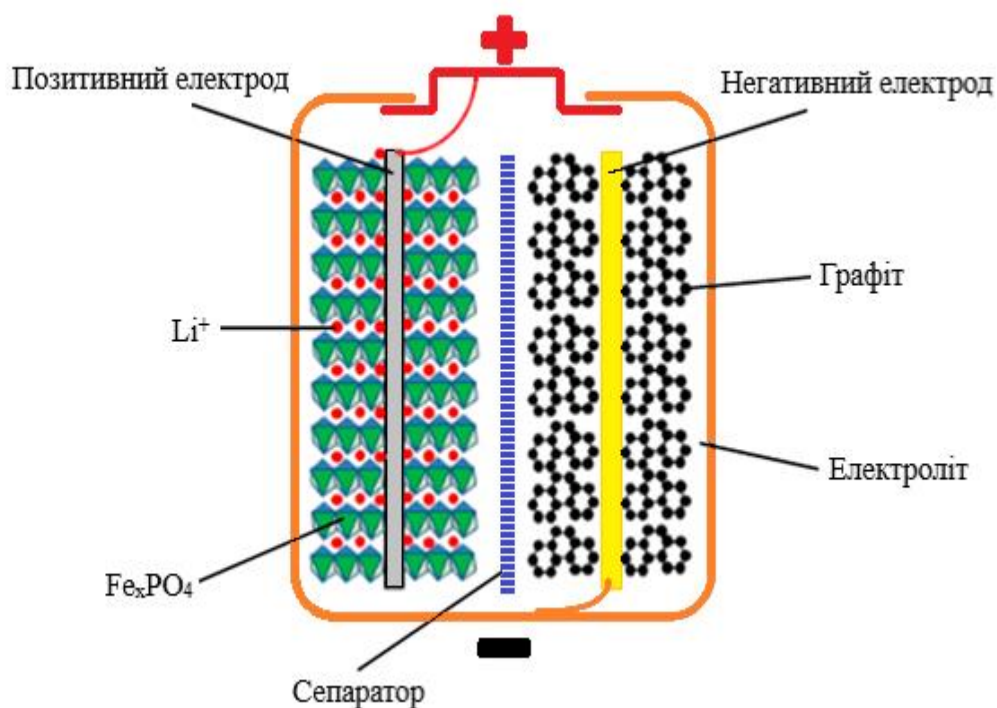


Рисунок 1.12 – Будова LiFePO_4 акумулятора [19]

Як можна побачити з рисунка 1.12 структура літій-залізо-фосфатного акумулятора містить стандартний перелік елементів: анод, катод, електроліт та сепаратор. Всі вище вказані елементи є основою акумулятора. Зазвичай анод виготовляється з графіту, а катод – ферофосфат літію. Сепаратор, що розміщений між анодом та катодом, виконує функцію розділення вказаних електродів один від одного.

У ході процесу заряджання акумулятора іони літію прямують від позитивного електроду до негативного електроду. Процес розряджання зворотній – іони літію прямують від негативного електроду до позитивного.

Кількість циклів заряджання-розряджання у літій-залізо-фосфатного акумулятора одна з найбільших, становить у межах від 2 тис. до 10 тис. циклів.

Широкий діапазон циклів спричинений різними факторами: виробник, температура експлуатації, струм навантаження та заряджання, якість зарядного пристрою. Більшість LiFePO_4 акумуляторів мають п'ять тисяч циклів.

DoD (depth of the discharge) або глибина розряду літій-залізо-фосфатного акумулятора знаходиться в діапазоні від 80 до 90%, що є позитивною стороною вказаних батарей.

LiFePO_4 батареї як і всі акумулятори мають переваги та недоліки.

Позитивні сторони:

- екологічна безпека, склад LiFePO_4 акумуляторів є екологічно чистим, у ньому відсутні шкідливі речовини такі як нікель (Ni) та кобальт (Co);
- довготривалий термін використання, LFP акумулятори розраховані на 2-10 тис. циклів заряд-розряд;
- безпека експлуатації, LiFePO_4 акумулятори є безпечнішим типом батарей ніж інші типи Li-іон акумуляторів, так як вони через свої характеристики мають меншу ймовірність перегрівання та займання;
- експлуатація при низьких температурах до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Негативні сторони:

- висока ціна, у порівнянні з іншими акумуляторами LFP батареї суттєво дорожчі, але з часом їхня ціна може знизитись;
- час заряджання дещо більший чим у Li-іон батареях;
- нижча щільність енергії ніж у Li-іон акумуляторах.

Через збільшення потреб у ефективних та якісних накопичувачах електричної енергії LFP зарекомендували себе для різних сфер. Сьогодні вони дуже популярні для різних потреб, зокрема: відновлювальна енергетика (ВЕС та СЕС), електротранспорт, гібридні авто, зовнішні накопичувачі, дрони, електроінструмент, застосування у медицині, портативна електроніка, резервні накопичувачі енергії тощо.

Отже, LiFePO_4 акумулятори це сучасні накопичувачі енергії, які стабільно працюють та мають велику кількість циклів заряд-розряд, крім того являються безпечними у використанні.

1.5.2 Накопичення енергії в проточних акумуляторах

Проточні акумулятори – це батареї у яких накопичення енергії забезпечується двома хімічними елементами, що розчинені в електроліті, який зберігається у резервуарах та перекачується за допомогою насосів. Для відокремлення розчинів електроліту використовується спеціальна мікроскопічна мембрана.

Існує два типи на які поділяють накопичувачі електроенергії у проточних акумуляторах: гібридні проточні акумулятори та окисно-відновні батареї. Вказані типи накопичувачів будуть розглянуті далі.

1.5.2.1 Цинк-бромні ZnBr проточні акумулятори

Цинк-бромні проточні акумулятори або ZBFB – це акумулятори, які були розроблені компанією Еххон та Національним управлінням з авіації та дослідження космічного простору в 1970-х роках [20].

ZBFB – це гібридні проточні акумулятори, які накопичують енергію завдяки використанню окисно-відновних реакції між цинком (Zn) та бромом (Br).

За конструкцією цинк-бромні проточні акумулятори налічують 2-і окремі розчини електролітів, які зберігаються у спеціальних резервуарах. Перший резервуар містить розчин електроліту броміду цинку, а другий бром. Вказані розчини розділяються один від одного за допомогою мікропористої мембрани, яка не дає розчинам змішуватись, але пропускає іони.

У ZBFB електричний струм використовується для переміщення іонів між двома резервуарами під час процесу заряджання. Іони цинку збираються на аноді, де вони перетворюються на металевий цинк, тоді як іони бром у збираються на катоді і утворюють газоподібний бром, який розчиняється в електроліті [9]. Під час процесу розряджання відбувається обернений процес, що призводить до генерації електричної енергії.

Основні переваги цинк-бромних проточних акумуляторів: тривалий термін роботи, здатність до переробки, висока питома енергія, широкий вибір ємності. Основні недоліки: менша щільність енергії ніж у Li-ion акумуляторів, великі габарити та вага, невеликий ККД – 70-80 %, потреба у періодичному повному заряджанні.

Наразі використання ZBFB обмежене через габаритність та вагу всієї конструкції. Відповідний тип батарей в основному є стаціонарним. Їх застосовують для відновлювальних джерел енергії, таких вітрова та сонячна енергетика.

Таким чином, цинк-бромні проточні акумулятори є перспективним рішенням у якості накопичувачів енергії, через тривалий термін експлуатації, екологічність та масштабність запропонованої ємності. З розвитком ВДЕ ZBFB можуть стати ключовими накопичувачами електроенергії.

1.5.2.2 Ванадієві акумулятори

Ванадієві акумулятори або ванадієві окисно-відновні акумулятори у повній конструкції були винайдені інженером у галузі хімії Марією Скіллас-Казакос у 1986 році.

Накопичення енергії у ванадієвих акумуляторах відбувається завдяки перенесенню електронів між різними іонами ванадію (V). Для відокремлення ємностей з електролітом використовується мембрана. Основні елементи структури ванадієвих акумуляторів: позитивний та негативний електрод, електроліт, два резервуари та два насоси, мембрана, перетворювач напруги.

Ванадієві батареї використовують оборотний потік іонів для акумуляування та вивільнення енергії. Під час процесу зарядки іони V^{3+} на аноді "приймають" електрон, перетворюючись на V^{2+} , а V^{5+} на катоді стають V^{4+} . У ході циклу розрядження V^{2+} перетворюються на V^{3+} з вивільненням електрона, V^{4+} на V^{5+} .

Ємність ванадієвих акумуляторів залежить від кількості та розмірів резервуарів, у яких зберігається електроліт.

Ванадієві окисно-відновні акумулятори в більшості використовуються як стаціонарні накопичувачі електричної енергії. Тому що їхня конструкції є дуже габаритною. Проте останнім часом вони знайшли своє застосування для ДБЖ, СЕС, ВЕС та вирівнювання навантаження.

Позитивні сторони застосування ванадієвих акумуляторів:

- довговічність;
- велика ємність та потужність;
- швидка відповідь.

Негативні сторони:

- великі габарити та вага;
- висока вартість будівництва.

Підсумовуючи можна сказати, що ванадієвим акумуляторам характерна велика ємність та швидка відповідь, проте вони мають велику конструкцію, тому є чудовим рішенням для стаціонарного застосування.

1.5.2.3 Полісульфідно-бромідні акумулятори

Полісульфідно-бромідні акумулятори вважаються окислювально-відновлюваними накопичувачами електроенергії. У них акумуляування енергії відбувається у двох електролітах: полісульфіду натрію та бромиду натрію. З метою розмежування вище зазначених електролітів застосовується полімерна мембрана. З однієї сторони вона обмежує перетік електролітів, з іншої надає можливість катіонам натрію переміщуватись між електродами.

Процес заряджання полісульфідно-бромідного акумулятора [21]:

1. На позитивному електроді трибромід натрію змінюється на бромід натрію: $\text{NaBr}_3 + 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 3\text{NaBr}$.

2. На негативному електроді дисульфід натрію змінюється на полісульфід натрію: $2\text{Na}_2\text{S}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{S}_4 + 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^-$.

Цикл розряджання акумулятора відбувається у зворотному напрямку.

Полісульфідно-бромідні акумулятори широко використовуються для резервних джерел енергії, електричного транспорту (електромобілі та електробуси), стаціонарного акумулювання енергії у енергосистемах тощо.

Розглянемо, які є переваги та недоліки у полісульфідно-бромідних акумуляторів.

Основні переваги:

- моментальна відповідь (20 мс у разі підключення навантаження);
- мають незначний вплив на навколишнє середовище;
- відсутність самостійного розряду.

Основні недоліки такої системи акумулювання енергії:

- вартість виготовлення;
- використання небезпечного токсичного хімічного елементу - броду.

Отже, розглянутий тип акумуляторів попри наявні недоліки має значний потенціал у майбутньому, так як з плином часу будуть розвиватись різні технології, що призведуть до здешевлення вартості виготовлення.

1.5.3 Гібридні системи накопичення енергії

Гібридні системи накопичення енергії – це такі системи, що поєднують у собі використання кількох систем накопичення енергії разом. Гібридні системи можна розділити на дві категорії:

- системи, що накопичують велику густину енергії, мають довший час відповіді, проте накопичена енергіє може видаватись протягом тривалого часу;
- системи, які акумулюють велику потужність, час реакції у цих систем звiсно менший, проте вони навпаки мають обмежений час видачі енергії.

Будівництво гібридних систем акумулювання енергії відбувається за рахунок злиття системи з великою густиною та системи з великою потужністю [22].

Розглянемо можливі варіанти поєднання вказаних систем вище для гібридних систем накопичення енергії (табл. 1.4.).

Таблиця 1.4 – Комбінація систем накопичення великої густини енергії та великої потужності для гібридної системи накопичення

№	Системи з великою густиною енергії	Системи з великою потужністю
1	Цинк-бромні акумулятори	Ванадієві проточні акумулятори
2	Водневі батареї	Суперконденсатори
3	Ванадієві проточні акумулятори	Літій-іонні акумулятори
4	Накопичувачі стисненого повітря	Конденсатори
5	Свинцево-кислотні акумулятори	Надпровідна магнітна система акумуляування

Слід зауважити, що будівництво деяких варіантів поєднання систем накопичення енергії наразі неможливо через технічні проблеми та масштаби будування.

Комбінація ванадієвого проточного та літій-іонного акумуляторів являється однією із найбільш використовуваних гібридних систем накопичення енергії.

Висновки до першого розділу

У відповідному розділі було проведено аналіз існуючих систем накопичення енергії, а саме: механічних, теплових, хімічних, електричних, гібридних систем та електрохімічних систем. Можна побачити, що вказані системи мають як і позитивні так і негативні аспекти та підходять для тих чи інших застосувань.

Для кожної із систем розглянуто конструкцію, принцип роботи, характеристики, застосування, переваги та недоліки.

Серед механічних систем накопичення енергії найбільше використовується ГАЕС, накопичувачі на стисненому повітрі та маховикові накопичувачі. Відповідні системи мають високий ККД та тривалий термін експлуатації, але нездатні швидко реагувати. Крім того у механічних системах обмежена можливість масштабування.

Накопичувачі явного тепла та термохімічні накопичувачі енергії вважаються основними накопичувачами теплової енергії. Ці системи зарекомендували себе через тривалий термін зберігання енергії, проте відповідь у цих систем довша.

Хімічні системи накопичення енергії базуються на використанні хімічних реакцій для накопичення хімічної енергії. Вони відомі через широкий вибір потужності та велику щільність енергії. Головним недоліком такої системи є потреба у ретельній утилізації.

У електричних накопичувачах енергії конденсатори та суперконденсатори славляться високим значенням ККД та мають миттєвий час відповіді. Однак в ЕСНЕ невелика густина енергії та їхнє виробництво дорогавартісне.

Поєднання різних систем накопичення енергії притаманне гібридним системам накопичення енергії. З однієї сторони це системи з високою гнучкістю та високою ефективністю, з іншої – системи, у яких ускладнена конструкція та велика вартість виробництва.

Електрохімічні системи накопичення енергії наразі являються найрозповсюдженішими системами накопичення енергії. Причиною цього стали суттєві переваги над іншими системами. По-перше, електрохімічні системи налічують широкий діапазон потужності та мають високу густину енергії, що важливо для сучасних потреб. По-друге, вони мають швидкий час реакції. По-третє, у електрохімічних системах під час роботи відсутні викиди шкідливих речовин.

Зі збільшенням попиту на сучасні та ефективні системи накопичення енергії електрохімічні системи, через присутні переваги над іншими, сприятимуть стійкому майбутньому енергетики.

2 СТРУКТУРА СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Розглядаючи існуючі електрохімічні системи накопичення енергії було визначено, що найбільш розповсюдженими електрохімічними системи вважаються акумуляторні системи накопичення енергії (АСНЕ) та проточні акумулятори.

Відповідні технології накопичення енергії мають ряд переваг: висока щільність енергії, екологічність, безпека використання, продуктивність, висока потужність тощо. Однак використання системи накопичення енергії проточних акумуляторів вважається суттєво витратнішим та складним у реалізації, тому наразі АСНЕ є найпопулярнішою електрохімічною системою акумуляування енергії.

Розглянемо структуру АСНЕ (рис 2.1). Основним елементом такої системи, звісно, є акумуляторні батареї, що з'єднані паралельно або послідовно, в залежності від потрібної напруги, струму та потужності. Для керування акумуляторними батареями використовується система BMS: регулює рівень заряджання/розряджання, запобігає перевантаженню та короткому замиканню, слідкує за температурним режимом кожного акумулятора. BMS також контролює: стан заряду (SoC – state of charge): залишкова ємність до повного розряджання, вимірюється у відсотках; поточний стан акумуляторної батареї (SoH – state of health): інформує про поточну максимально можливу ємність заряджання у порівнянні з ідеальною ємністю акумулятора, також вимірюється у відсотках.

Наступним елементом структури є система перетворення електроенергії (PCS – power conversion system). PCS складається з перетворювача енергії та системи керування перетворювачем. Для перетворення постійного струму на змінний струм використовується інвертор.

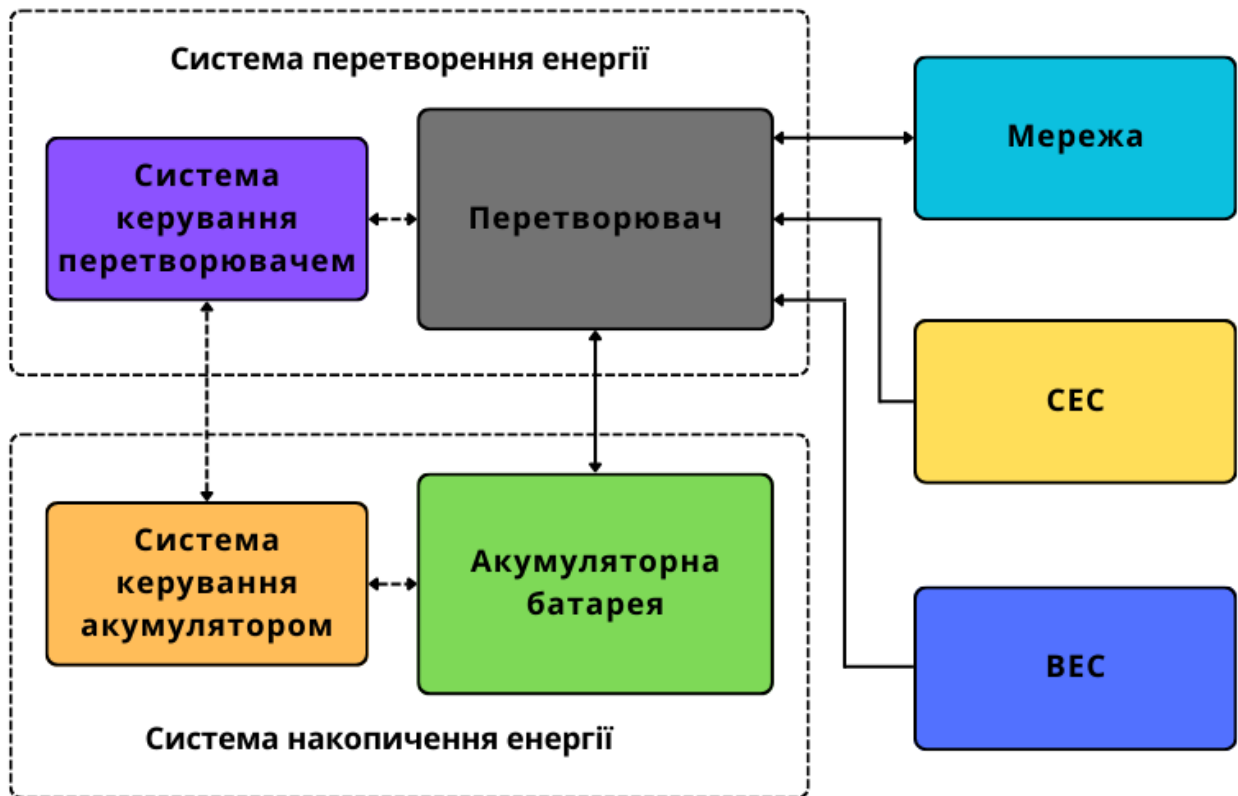


Рисунок 2.1 – Структура акумуляторної системи накопичення енергії

З рисунка 2.1 можна побачити, що на схемі також присутні СЕС, ВЕС та зовнішня мережа. Споживання електричної енергії відбувається через зовнішню мережу. АСНЕ може накопичувати електроенергію від зовнішньої мережі, сонячної та вітрової електростанцій або інших джерел енергії. Отже, АСНЕ являються частиною інших енергетичних систем.

2.1 Основні параметри акумуляторних батарей

Для початку розглянемо еквівалентну схему заміщення (рис. 2.2) акумуляторної батареї. Схема, що зображена на рисунку 2.2 також називається схемою *Rint*. Відповідна схема є спрощеною, але пояснює принцип роботи акумулятора.

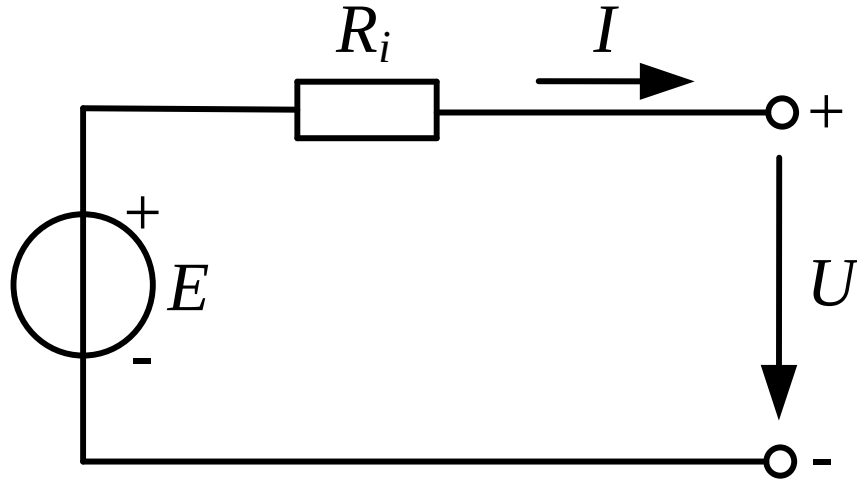


Рисунок 2.2 – Еквівалентна схема заміщення акумулятора

На вказаній схемі заміщення E – електрорушійна сила або напруга неробочого ходу, R_i – внутрішній опір, I – струм, що протікає під час підключення навантаження, U – напруга між двома електродами акумулятора.

Першим параметром акумуляторної батареї є номінальна напруга U_n , яка є середнім значенням напруги під часу процесу розрядження.

Напруга U між електродами акумулятора обраховується за наступним виразом:

$$U_n = E - R_i I \quad (2.1)$$

Середнє значення напруги однієї комірки Li-ion акумулятора становить 3.7 В [9]. Свинцево-кислотні та LiFePO_4 акумулятори розраховані на напругу 12 В, 24 В та 48 В.

Внутрішній опір R_i акумулятора впливає на максимально можливий струм навантаження, чим менший внутрішній опір тим більше значення струму навантаження. Якщо R_i акумулятора зростає, то в такому випадку збільшуються теплові втрати, що призводять до зниження терміну експлуатації.

Наступним важливим параметром акумуляторної батареї являється ємність C . Ємність батареї – кількість заряду, що може генерувати акумулятор

при заданій номінальній напрузі батареї. Електричний заряд вимірюють в Кулонах, однак ємність акумулятора прийнято вимірювати в А·год (1 А·год = 3600 Кл), тому що в електриці енергія вимірюється у Вт·год.

Енергія акумулятора вимірюється у Вт·год. Це енергія, яку акумуляторна батарея може накопичити або генерувати. Обрахунок енергії проводять за наступною формулою:

$$E_{\text{бат}} = C_{\text{бат}} \cdot U \quad (2.2)$$

Для порівняння різних типів акумуляторних батарей використовують питому енергію $\left(\frac{\text{Вт}\cdot\text{год}}{\text{кг}}\right)$, питому потужність $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{кг}}\right)$, густину енергії $\left(\frac{\text{Вт}\cdot\text{год}}{\text{м}^3}\right)$ та густину потужності $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}\right)$ [9].

Не менш важливим параметром акумулятора є швидкість струму розрядження акумулятора *C*-rate, обчислюється як: $\frac{C}{R}$, де *R* – потрібна кількість годин до повного розрядження акумулятора. Для прикладу, якщо ємність акумуляторної батареї становитиме 100 А·год, а швидкість розрядження становить $\frac{C}{20}$, то це означає що акумулятор ємністю 100 А·год при протіканні через нього струму навантаження 5 А працюватиме 20 годин, однак е дійсності час буде меншим.

SoC (State of charge) – стан заряду акумуляторної батареї, який інформує про залишкову ємність батареї, вимірюється у відсотках. Якщо батарея розрядилась на 30 А·год від номінальної ємності 100 А·год, то SoC дорівнюватиме 70 %. Розрахунок SoC проводять за формулою:

$$SoC = \frac{E_{\text{бат}}}{C_{\text{бат}} \cdot U} \quad (2.3)$$

Подібним параметром до SoC є DoD (deep of discharge) – глибина розряду акумуляторної батареї. DoD – це важливий параметр за яким оцінюють робочий стан батареї. Одиницею вимірювання є відсотки. Розглядаючи попередній приклад, глибина розряду становитиме 30 %. Глибина розряду також впливає на кількість циклів заряд/розряд акумуляторної батареї.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) – невід’ємний параметр при виборі акумулятора. ККД вимірюється у відносних одиницях або відсотках. ККД акумулятора розділяють на дві групи: Кулонівський ККД та енергетичний ККД. Кулонівський коефіцієнт корисної дії визначають за формулою:

$$\eta_z = \frac{Q_{\text{роз}}}{Q_{\text{зар}}}, \quad (2.4)$$

де $Q_{\text{роз}}$ – заряд розрядження, Кл;

$Q_{\text{зар}}$ – заряд зарядження, Кл.

Енергетичний ККД обраховують за наступним виразом:

$$\eta_e = \frac{W_{\text{роз}}}{W_{\text{зар}}}, \quad (2.5)$$

де $W_{\text{роз}}$ – енергія генерації, Вт·год;

$W_{\text{зар}}$ – енергія отримана під час процесу зарядження акумулятора, Вт·год.

Енергетичний ККД менший за Кулонівський, так як він включає наявні розсіювання акумуляторної батареї, які відбуваються під час циклів зарядження та розрядження.

Термін експлуатації батареї завершується коли ємність акумулятора знижується до 70-80 % номінального значення. Виробники батарей вказують орієнтовний період роботи акумулятора, так як термін служби акумуляторної батареї, крім вказаних факторів вище, також залежить від температури використання та вологості повітря.

Кількість циклів заряд/розряд залежить від типу акумуляторної батареї. У випадку свинцево-кислотних батарей – від 300 до 800 циклів, Li-ion – від 300 до 500 циклів, LiFePO₄ – більше двох тисяч циклів.

Саморозряд акумулятора – це процес розрядження акумуляторної батареї через внутрішні хімічні реакції. Швидкість самотійного розрядження акумулятора зростає зі збільшенням внутрішнього опору. Зазначений параметр є важливим для акумуляторів тривалого застосування.

SoH (State of health) – стан «здоров'я» акумулятора. Є дуже важливим параметром, так як SoH відображає різницю ємностей акумулятора, що використовується та нового акумулятора [12]. Стан «здоров'я» акумулятора вимірюється у відсотках. Визначення SoH виконують за наступною формулою:

$$SoH = \frac{C_{max}}{C_{ном}} \cdot 100 \%, \quad (2.6)$$

де C_{max} – максимальна поточна ємність, А·год;

$C_{ном}$ – номінальна ємність акумулятора, А·год.

2.2 Математичні моделі акумуляторних батарей

Для проведення моделювання акумуляторної батареї використовуються математичні моделі. Еквівалентні схеми заміщення відображають основні параметри акумуляторних батарей: ємність, внутрішній опір, номінальна напруга, опір провідників [23].

Спрощена еквівалентна схема заміщення (рис. 2.2) була розглянута в попередньому підрозділі. Перевагою схеми R_{int} є простота конструкції. Недоліком цієї схеми є те, що вона не враховує температуру навколишнього середовища, саморозряд та старіння батареї.

Наступною математичною моделлю акумулятора є резистивно-конденсаторна RC модель (рис. 2.3). У відповідній схемі конденсатори виступають у якості джерела енергії.

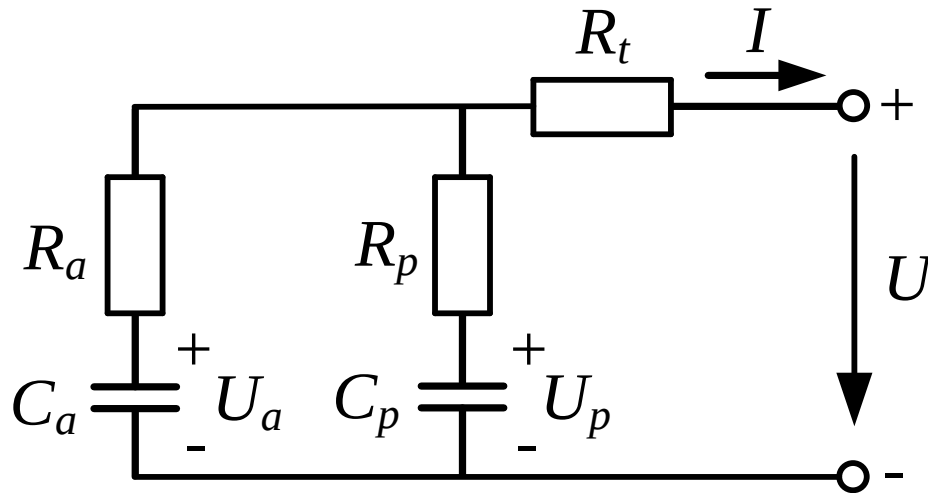


Рисунок 2.2 – Резистивно-конденсаторна RC батарея

RC модель складається з: двох конденсаторів C_a та C_p , трьох опорів R_a , R_p , R_t . Конденсатор C_a – це накопичувальний конденсатор, що зберігає хімічну енергію. Їмність C_a дуже велика. Конденсатор C_p – це ємність, що являє собою поверхневий ефект, ємність такого конденсатора невелика. R_a – кінцевий резистор, R_p – опір ємності C_p , R_p – опір клеми акумулятора. U – напруга на клеммах. За рахунок зміни напруги на C_a та C_p визначається стан заряду акумулятора SoC.

Основні рівняння для обрахунку RC акумулятора:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_a(R_a + R_p)} & \frac{1}{C_a(R_a + R_p)} \\ \frac{1}{C_p(R_a + R_p)} & \frac{-1}{C_p(R_a + R_p)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_p}{C_a(R_a + R_p)} \\ \frac{-R_a}{C_p(R_a + R_p)} \end{bmatrix} \cdot [I] \quad (2.7)$$

Перевагою такої схеми є здатність перевіряти стан заряду батареї. Недолік RC моделі полягає у наявності великої похибки SoC при низькому рівні зарядки.

Наступною математичною моделлю акумулятора є модель Тевеніна першого порядку (рис. 2.3).

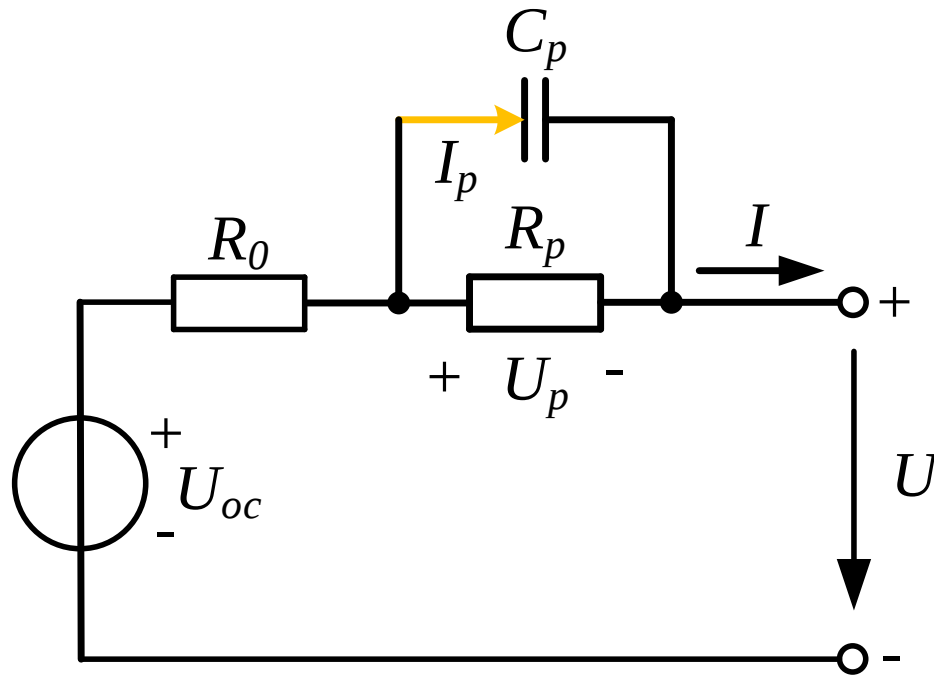


Рисунок 2.3 – Модель Тевеніна першого порядку

Еквівалентна модель Тевеніна 1-о порядку складається з: джерела електрорушійної сили U_{oc} ; конденсатора C_p , що підключений паралельно резистору R_p ; резистора R_0 . Конденсатор C_p – це еквівалентна ємність, що призначена для опису перехідних процесів, які виникають під час циклів заряджання та розряджання. Внутрішній опір акумулятора представлений поляризаційним опором R_p та омичним опором R_0 .

Обрахунок математичної моделі акумулятора Тевеніна 1-о порядку проводиться за наступним рівнянням:

$$\begin{cases} \dot{U}_p = -\frac{U_p}{R_p \cdot C_p} + \frac{I}{C_p}; \\ U = U_{oc} - U_p - I \cdot R_0. \end{cases} \quad (2.8)$$

З метою покращення опису перехідних процесів, а саме врахування поляризаційних ефектів (електрохімічна поляризація та поляризація концентрації) була розроблена акумуляторна модель Тевеніна другого порядку

або як її часто називають - модель подвійної поляризації. Еквівалентна схема вказаної моделі зображена на рисунку 2.4. Відрізняється модель подвійної поляризації від моделі Тевеніна 1-го порядку присутністю додаткової ланки RC.

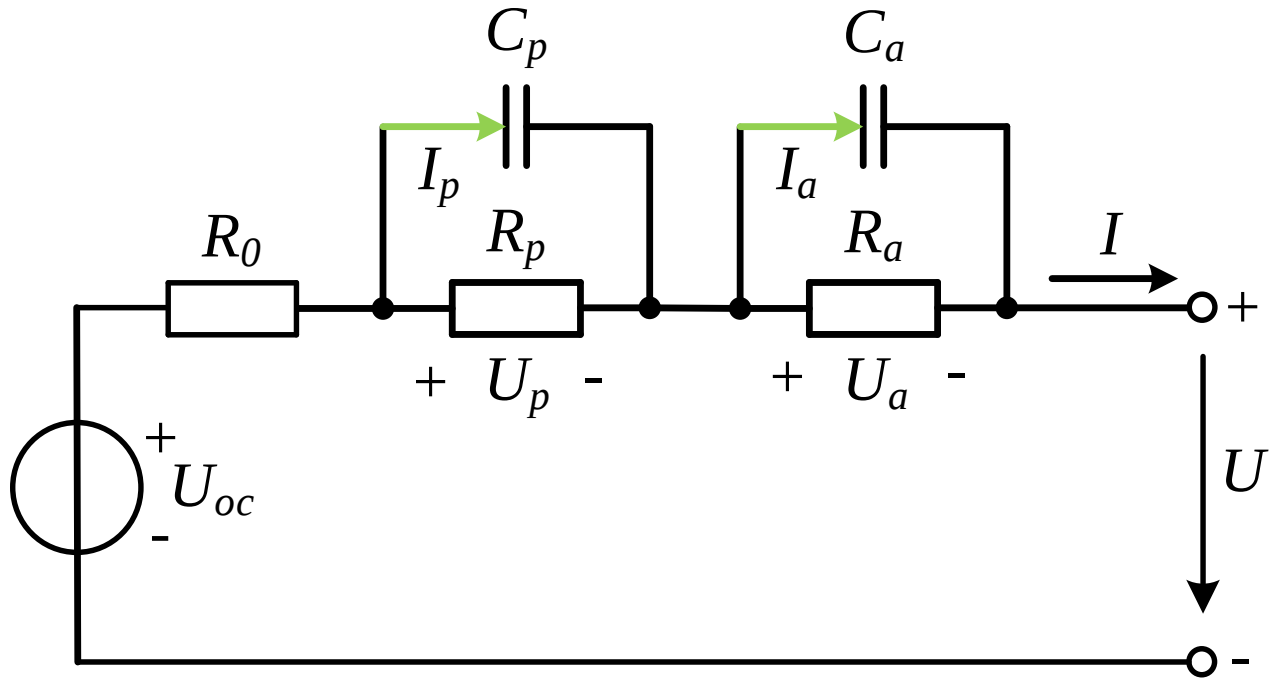


Рисунок 2.4 – Модель Тевеніна другого порядку

Основні елементи моделі подвійної поляризації:

- напруга неробочого ходу U_{oc} ;
- активний опір R_0 ;
- ефективний опір, що складається з резисторів R_p та R_a ;
- поляризаційні ємності C_p та C_a .

Внутрішній опір акумулятора за моделлю Тевеніна 2-о порядку складається з резисторів R_0 , R_p та R_a .

Математичні формули, що описують принцип роботи моделі подвійної поляризації:

$$\begin{cases} \dot{U}_p = -\frac{U_p}{R_p \cdot C_p} + \frac{I}{C_p}; \\ \dot{U}_a = -\frac{U_a}{R_a \cdot C_a} + \frac{I}{C_a}; \\ U = U_{oc} - U_p - U_a - I \cdot R_0. \end{cases} \quad (2.9)$$

Розглянута модель акумуляторної батареї має ряд переваг над моделлю першого порядку, по-перше, підвищена точність, по-друге, можливість збільшення компонентів RC. Проте основний недолік цієї схеми полягає у складності конструкції та збільшені теплових втрат при додатковому додаванні RC ланок [24].

2.3 Система керування акумулятором BMS

Систему керування акумулятором BMS (Battery management system) – це одна із основних складових АСНБ, яка призначена для керування акумуляторною батареєю. BMS є ключовим елементом для літій-іонних та літій-залізо-фосфатних акумуляторів.

BMS виконує функцію контролю за такими параметрами акумулятора як: напруга заряджання/розряджання, температура акумулятора, струм навантаження.

Система BMS слідкує за станом заряду батареї SoC та станом «здоров'я» акумуляторної батареї SoH. Вказані параметри є важливо-необхідними для тривалого та безпечного використання акумулятора.

Система керування акумулятором балансує комірки акумулятора під час циклу заряджання та розряджання [25]. Зазначене балансування батареї необхідне для гарантування довгого терміну експлуатації та з метою покращення продуктивності акумулятора.

Для забезпечення високої напруги акумуляторної батареї використовуються модулі (комірки), які з'єднуються послідовно. Величина

напруги залежить від кількості модулів, чим більше послідовно з'єднаних модулів тим вище значення напруги. Щоб отримати потрібну потужність акумуляторної батареї модулі з'єднуються паралельно. Як у випадку з напругою, щоб збільшити потужність акумулятора необхідно збільшити кількість модулів. Система модулів, які розташовані поруч один біля одного формують загальний модуль, який із використанням BMS називається акумуляторною батареєю.

Існують два основних типи системи керування акумулятором:

- інтегрована BMS, система яка вбудована в акумуляторну батарею, використовується, зазвичай, у портативних електронних пристроях таких як зовнішні накопичувачі, ноутбуки, смартфони, квадрокоптери, електроінструменти;
- зовнішня BMS, система що приєднується до акумуляторної батареї, в основному застосовується у великих системах таких як СЕС, ВЕС, системи резервного живлення, електромобілі.

2.3.1 Захисти системи керування акумуляторною батареєю

Однією з основних функцій BMS є захист батареї. Система керування батареєю має наступні типи захистів:

- захист від перезаряджання та розряджання, BMS слідкує за напругою кожного модуля акумулятора, у разі досягання критичного значення напруги під час процесу заряджання/розряджання BMS відключає зарядний пристрій чи навантаження;
- захист від коротких замикань, короткі замикання можуть бути внутрішні або зовнішні, що можуть спричинити перегрівання та вихід з ладу акумулятора, система керування акумулятором відключає модуль або групі модулів в котрій виник режим КЗ;
- захисти від критичних температур, BMS контролює температури комірок та всієї акумуляторної батареї, при зміні температур навколишнього середовища, підвищені чи знижені температури, BMS нормалізує її до безпечного рівня.

Отже, захисні функції системи керування акумулятором забезпечують стабільну роботу, запобігають виникненню небезпечних ситуацій, а також дозволяють працювати з максимальною потужністю.

2.3.2 Структурні схеми BMS

Існують різні схеми підключення BMS до акумуляторних батарей. Серед багатьох схем потрібно виділити:

- централізований BMS;
- модульний BMS;
- головний/підпорядкований BMS.

На рисунку 2.5 зображена структурна схема централізованої системи керування акумулятором, яка є найпростішою та широко розповсюдженою схемою. Централізована BMS складається з однієї централізованої системи керування батареєю, що керує всіма модулями акумуляторних батарей [25]. До переваг використання централізованого BMS відноситься:

- простота конструкції;
- невелика вартість впровадження.

При підключенні великої кількості акумуляторних модулів виникає потреба у значній кількості кабелів, проводів та роз'ємів, що є головним недоліком такої схеми.

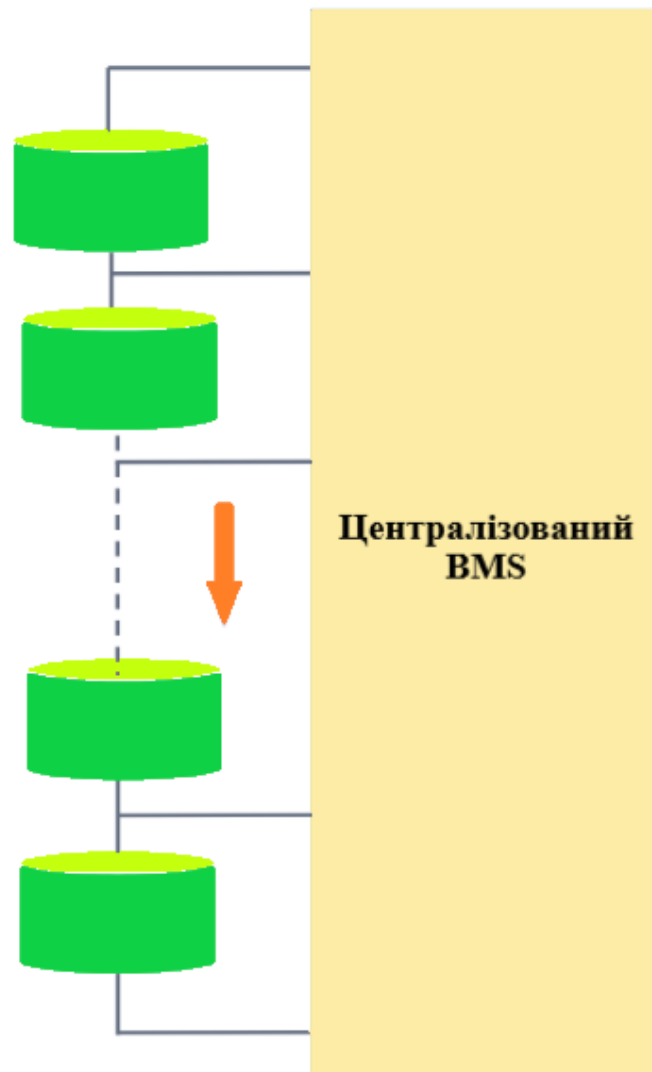


Рисунок 2.5 – Структурна схема централізованого BMS [26]

Наступна схема BMS – модульна система керування акумулятором. Модульний BMS дещо схожий до централізованого, але він поділений на кілька окремих модулів. Модульний BMS складається з головного BMS та другорядних BMS. Головний модуль BMS у разі необхідності керує другорядними BMS, які підключені до нього.

Застосування модульної схеми BMS зменшує розрахункові зусилля та сприяє спрощенню обслуговування та виявлення дефектів. Недоліком такої схеми вважається підвищена вартість, у порівнянні з централізованим BMS.

Структурна схема головного/підпорядкованого BMS у більшості використовується для керування та моніторингу акумуляторних батарей у

розгалужених та великих системах [26]. Головна/підпорядкована BMS складається з головного модулю, який контролює роботу підпорядкованих модулів. Підпорядковані модулі BMS використовуються для передачі інформації до головного модуля BMS. Головний модуль BMS виконує функції керування, розрахунків та передачі інформації.

Переваги головного/підпорядкованого BMS:

- нескладна конструкція;
- стійкість до відмов;
- зменшення витрат для забезпечення зв'язку.

Негативні аспекти:

- обмежена кількість функцій.

У висновку слід зауважити, що використання системи керування акумулятором є дуже важливим компонентом для сучасних АСНЕ. Тому що використання BMS збільшує продуктивність акумуляторних батарей, крім того, забезпечує надійну та безпечну роботу акумулятора.

2.4 Перетворювачі системи накопичення електроенергії

Перетворювач напруги або інвертор – це один із основних елементів структури АСНЕ, який призначений для перетворення постійного струму (DC – direct current) у змінний (AC – alternating current).

За типом вихідної напруги інвертори поділяються на:

- інвертори з модифікованою синусоїдою, на виході інвертора форма напруги відрізняється від нормальної синусоїди, вона є спотвореною, зазначені інвертори популярні через їхню здешевлену вартість, однак їх використання обмежується певними пристроями;
- інвертори з правильною синусоїдою, форма напруги на виході інвертора відображає правильну синусоїду, цей тип інверторів значно дорожчий, проте його можна використовувати для всіх пристроїв без обмежень.

Перетворювачі напруги поділяються на три основні типи [27]:

- автономний інвертор, перетворювач що функціонує без зовнішньої мережі, для його роботи потрібна тільки акумуляторна батарея;
- мережевий інвертор, перетворює постійний струм згенерований СЕС у змінний передаючи електроенергію у зовнішню мережу;
- гібридний інвертор, який поєднує у собі два вище вказані перетворювачі (автономний та мережевий), отримує енергію від ВДЕ, зовнішньої мережі та накопичує її у акумуляторних батареях, якщо існує надлишок електроенергії від СЕС та ВЕС, то відбувається процес заряджання акумуляторів, у випадку дефіциту електричної енергії від ВДЕ, енергія споживається від АСНЕ або зовнішньої мережі.

2.4.1 Автономний перетворювач напруги

Автономний перетворювач напруги – це інвертор що перетворює отриманий від джерел відновлювальної енергії або акумуляторів постійний струм у змінний, що використовується для більшості електроніки та побутових приладів.

Відмінною рисою автономних інверторів є обов'язкова наявність акумуляторної батареї для накопичення електроенергії від ВДЕ, так як відповідні перетворювачі не підключаються до електричної мережі.

Автономні інвертори випускаються з модифікованою та правильною синусоїдами. Існують також автономні перетворювачі частоти (VFD), які можуть бути використанні для регулювання швидкості обертання електродвигунів.

Використання автономних інверторів дуже різноманітне, їх можна використовувати у: приватних будинках, де найближчі електричні мережі знаходяться на великій відстані; автотранспорті, під час тривалих поїздок це чудове рішення, щоб підключити електронні пристрої змінного струму; джерелах резервного живлення, у разі відсутності електропостачання від зовнішньої мережі.

Переваги автономного інвертора:

- доступна вартість;

- простота конструкції;
- невелика вага;
- компактність;
- різноманітність дизайнів.

Недоліки:

- обмежений вибір потужності;
- залежність від накопичувачів енергії.

2.4.2 Мережевий перетворювач напруги

Основна відмінність мережевого інвертора від автономного полягає у відсутності необхідності використання акумуляторної батареї. Мережевий перетворювач підключається до ВДЕ, споживача та зовнішньої мережі. Якщо генерація СЕС та ВЕС перевищує споживання, то надлишкова електрична енергія передається у зовнішню мережу, та може бути продана за «зеленим» тарифом [27].

Мережевий інвертор працює за наступним принципом: ВДЕ генерують постійний струм DC, який потрапляє до інвертора та перетворюється на змінний AC. Вихідний струм інвертора AC синхронізується за частотою та фазою зовнішньої мережі.

Основні галузі використання мережевого інвертора: розподільчі системи виробництва електроенергії (місцеві електромережі), «домашні» фотоелектричні системи (приватні будинки), комерційне застосування (офісні будівлі та промислові підприємства).

Переваги використання мережевого інвертора:

- підвищена екологічність;
- можливість додаткового доходу за «зеленим» тарифом;
- відсутня необхідність у акумуляторних батареях.

Головні недоліки:

- залежність від електромережі;
- вартість дещо вища ніж у автономних перетворювачів.

2.4.3 Гібридний перетворювач напруги

Гібридний інвертор поєднує в собі функції автономного та мережевого перетворювачів [27]. Він також як і розглянуті інвертори працює за принципом перетворення DC в AC. Головною перевагою гібридного перетворювача над іншими є можливість роботи з та без зовнішньої мережі, крім того у них присутня функція передачі енергії до акумуляторних батарей, у час надлишкового виробництва від відновлювальних джерел енергії, з послідуочим накопиченням. Більшість гібридних перетворювачів обладнанні контролером стану заряду акумулятора.

Основним елементом конструкції гібридного інвертора є система керування, яка призначена для контролювання виробництва та споживання електроенергії. Воно розподіляє електричну енергію між споживачами, зовнішньою мережею та акумуляторними батареями, у залежності від виробництва та споживання, оптимізуючи при цьому процес використання електроенергії.

Гібридний перетворювач оснащений системами захисту, такими як: захист від зворотної напруги, яка може виникнути в разі зникнення живлення від мережі; захист від зниження/перевищення номінальної напруги; захист від надмірного навантаження зі сторони споживача. Вказані механізми захисту сприяють безпечній та надійній роботі під час експлуатації інвертора.

Позитивні аспекти:

- високе значення ККД;
- можливість роботи з та без мережі;
- комбінація ВДЕ та зовнішньої мережі;
- функція заряджання акумуляторних батарей.

Негативні аспекти:

- збільшені габарити та вага;
- висока вартість;
- складність налаштування.

Серед розглянутих типів інверторів гібридний інвертор має суттєві переваги над іншими – робота із зовнішньою мережею, можливість заряджання акумулятора, поєднання відновлювальних джерел енергії та зовнішньої електромережі. Загалом гібридний перетворювач це найоптимальніший варіант для застосування у ВДЕ, домашніх та комерційних енергосистемах.

2.4.4 Схеми перетворювачів напруги

Найпростішими та найбільш ефективними схемами перетворювачів напруги вважаються неізовані однокаскадні схеми [27].

На рисунку 2.6 зображена принципова електрична схема двонаправленого (можливість розряджання та заряджання акумулятора) однофазного перетворювача.

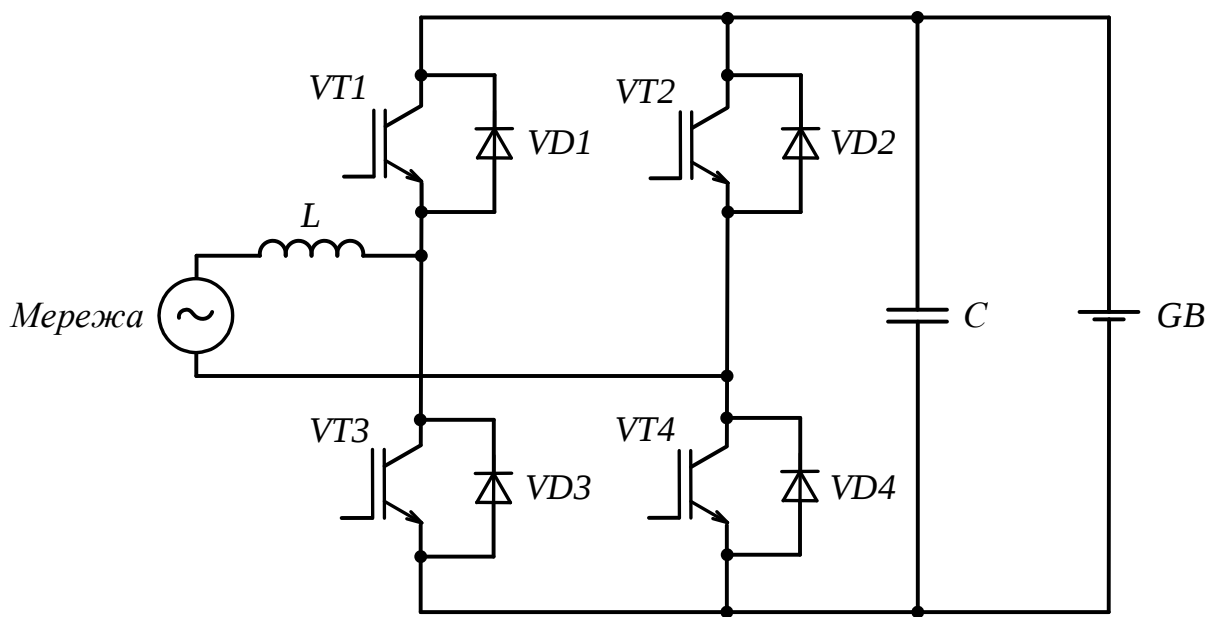


Рисунок 2.6 – Принципова схема однофазного перетворювача напруги

Схема зображена вище складається з: 4-х IGBT транзисторів: VT1, VT2, VT3, VT4; чотирьох діодів VD1, VD2, VD3, VD4; L-фільтра, C-фільтра; акумуляторної батареї GB; та зовнішньої мережі.

Схема однофазного інвертора побудована за принципом мостової схеми. Чотири транзистори розміщені таким чином, щоб отримати два напівперіоди

змінної напруги на виході перетворювача. Транзистори працюють попарно, для прикладу коли транзистори $VT1$ та $VT4$ відкриті, то транзистори $VT2$ та $VT3$ закриті. Для керування транзисторами використовується ШІМ (широтно-імпульсна модуляція). ШІМ генерує імпульси з різною шириною для того, щоб перетворити постійний струм у змінний. L -фільтр на схемі перетворювача використовується для згладжування пульсацій вихідної напруги інвертора. C -фільтр призначений для згладжування пульсацій напруги акумуляторної батареї, які виникають через хімічні процеси, що відбуваються всередині акумулятора. Також цей фільтр слугує для згладжування пульсацій напруги під час процесу заряджання акумулятора.

Схема трифазного двонаправленого перетворювача напруги зображена на рисунку 2.7.

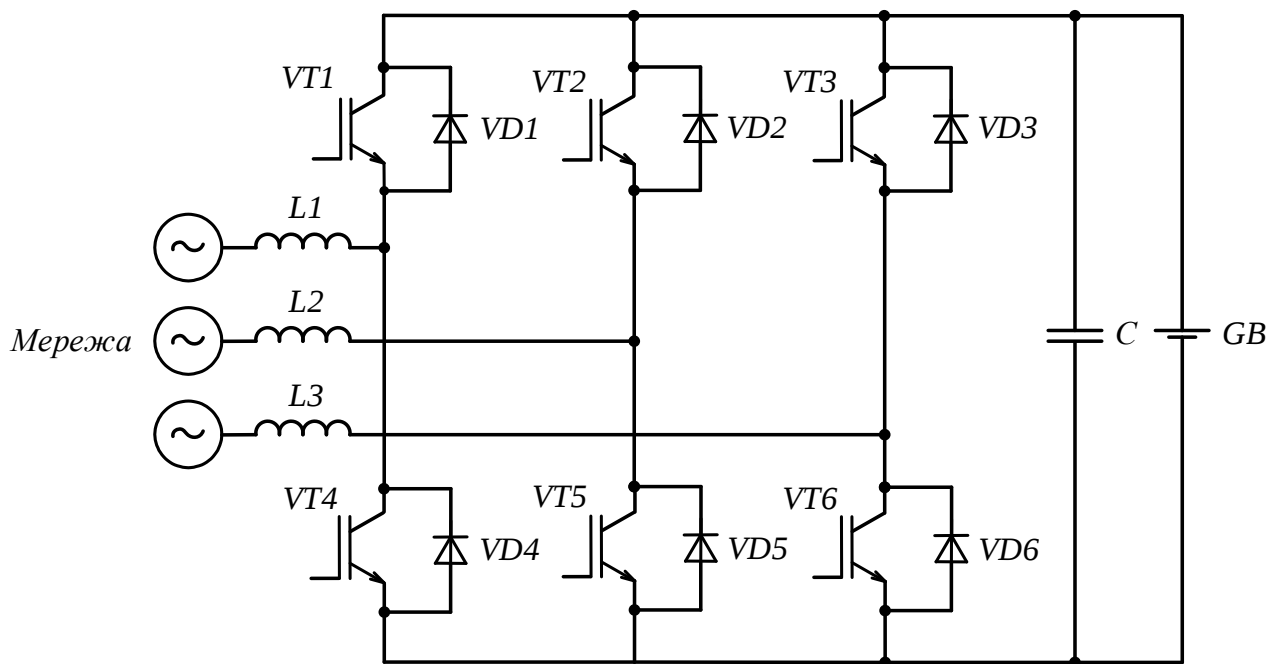


Рисунок 2.7 – Електрична схема двонаправленого трифазного перетворювача напруги

Як можна побачити з рисунку 2.7, перетворювач складається з 6-и IGBT транзисторів $VT1$, $VT2$, $VT3$, $VT4$, $VT5$, $VT6$; шести діодів $VD1$, $VD2$, $VD3$, $VD4$,

$VD5$, $VD6$; ємності C та 3-х індуктивних котушок $L1$, $L2$, $L3$, які виконують функцію фільтра; акумуляторної батареї GB ; зовнішньої мережі.

Розглянемо принцип роботи трифазного перетворювача напруги.

Режим інвертора – перетворення постійного струму в змінний. Для комутації струму використовуються транзистори, по два на кожну фазу. Роботу транзисторів забезпечує ШІМ контролер, що генерує керуючі сигнали. Для згладжування пульсацій напруг та струмів використовуються індуктивні котушки $L1$, $L2$, $L3$ по одній на кожну з фаз.

Режим випрямляча. Під час режиму випрямлення змінний трифазний струм подається на вхід перетворювача, силові транзистори відкриваються та закриваються у певний момент часу перетворюючи змінний струм у постійний. Випрямлений струм на виході перетворювача проходить через C -фільтр, який згладжує пульсації.

Однофазні та трифазні перетворювачі напруги використовуються у різних галузях, таких як: сонячна та вітрова енергетика; електротранспорт та зарядні станції; системи зберігання енергії – акумулятори, конденсатори, суперконденсатори; резервне живлення.

Висновки до другого розділу

Структура системи накопичення електричної енергії на основі електрохімічної технології складається з наступних підсистем: система накопичення енергії та система перетворення енергії. У якості навантаження та генерації електроенергії можуть виступати зовнішня мережа та ВДЕ.

Існують математичні та електрохімічні моделі акумуляторних батарей. Математичні моделі акумуляторної батареї дають змогу повністю відобразити характеристики акумулятора через математичні рівняння. Найбільш розповсюдженими моделями є модель R_{int} та модель RC , вони є найпростішими, проте їхня точність невелика. Модель Тевеніна другого порядку найбільш точно описує роботу акумуляторної батареї під час циклів заряджання та розряджання.

Система накопичення енергії складається з акумуляторної батареї та системи керування батареєю BMS. Акумулятор є основним елементом АСНЕ. В акумуляторі відбувається накопичення електроенергії для подальшого споживання, у час пікового навантаження або відсутності енергії від електромережі, вітрової та сонячної енергетики. BMS виконує функцію керування батареєю, слідкує за напругою заряджання, балансує комірки акумулятора, застерігає від нетипових ситуацій, таких як КЗ, перевантаження, перезаряд акумулятора тощо.

Перетворювачі напруги та система керування перетворювачами входить до складу системи перетворення електричної енергії. Перетворювач напруги призначений для перетворення постійного струму DC у змінний AC від ВДЕ, або навпаки з AC у DC, з метою заряджання батареї. Система керування перетворювачем напруги керує транзисторами (ключами), тобто відкриває та закриває транзистори у потрібний момент часу, що зумовлює постійний або змінний струм перетворюватись у AC чи DC струми.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ТА УСТАЛЕНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

3.1 Система накопичення електроенергії з реверсивним DC-DC перетворювачем напруги

Система накопичення електроенергії (СНЕ), що базується на акумуляторних батареях, працює у 2-х режимах:

- перший режим передбачає заряджання акумуляторної батареї;
- другий режим передбачає розряджання акумуляторної батареї.

3.1.1 Конструкція системи накопичення

Перетворювачі напруги DC-DC використовуються у відновлювальній енергетиці, електротранспорті, портативній електроніці, телекомунікаційному обладнанні тощо.

Розглянемо електричну схему DC-DC перетворювача напруги, яка зображена на рис. 3.1.

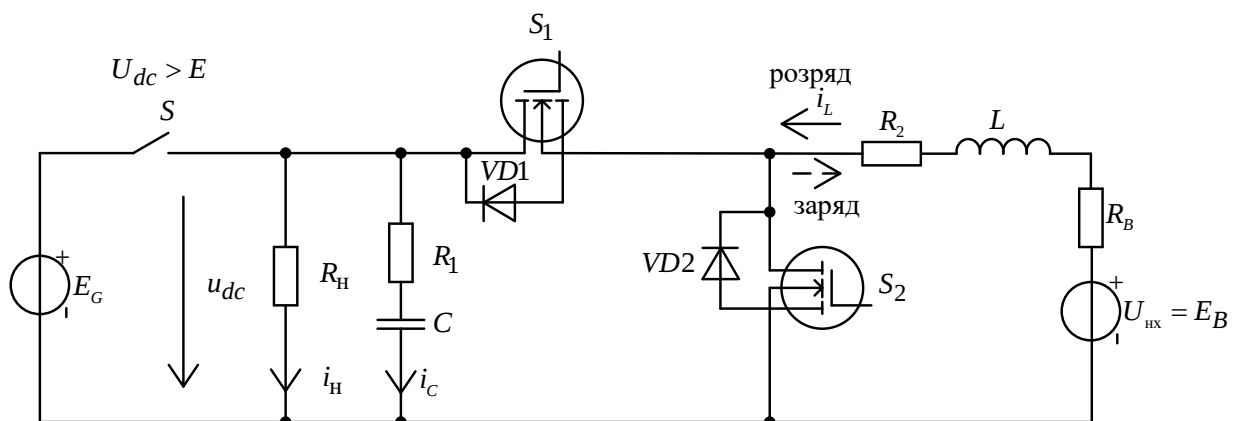


Рисунок 3.1 – Принципова схема СНЕ

Основні елементи електричної схеми:

- ЕРС зовнішнього джерела енергії E_G ;
- перемикач режимів СНЕ S ;
- опір навантаження R_H ;

- R_1C -фільтр;
- ключі що побудовані на основі польових транзисторів (*MOSFET*) S_1, S_2 [28];
- діоди $VD1$ та $VD2$;
- ЕРС джерела енергії на базі АБ E_B ;
- внутрішній (активний) опір акумулятора R_B ;
- R_2L -фільтр.

Джерелом напруги E_G можуть виступати сонячні чи вітрові електростанції, також можливе використання мережі постійного струму.

Регенеративний потік потужності у схемі (3.1) досягається через двонаправлену струмову двоквADRANTну реалізацію комутаційної мережі [29].

Перетворювач напруги постійного струму *DC-DC* підключений до АБ. Польові транзистори та діоди $VD1, VD2$ з'єднані антипаралельно. Коли ключ S_1 увімкнено, то ключ S_2 вимкнено, та навпаки. *RC*-фільтр використовується для згладжування пульсацій напруги на навантаженні. *RL*-фільтр призначений для захисту перетворювача від різких стрибків струму від акумуляторної батареї за рахунок сповільнення швидкості струму.

Під час процесу заряджання акумулятора струм i_L позитивний та проходить через транзистор S_1 та діод $VD2$. У ході процесу розряджання струм індуктивності i_L змінює свою полярність на негативну та протікає крізь транзистор S_2 та діод $VD1$. Такий перетворювач може знижувати або підвищувати вихідну напругу. Номінальна напруга акумулятора становить 24 В. Значення напруги джерела енергії E_G дорівнює 48 В. Ємність акумулятора прийнято рівною 50 А·год.

У двох режимах напруга акумуляторної батареї менша ніж напруга зовнішнього джерела живлення. Перемикання між двома режимами роботи здійснюється за допомогою ключа S , що керується логічним пристроєм.

Для забезпечення роботи системи накопичення електричної енергії застосовуються поширена система підпорядкованого регулювання.

3.2 Типове налаштування систем на основі підпорядкованого регулювання координат

Основними методами налаштування контурів вважається метод налаштування за модульним й симетричним оптимумами, та метод налаштування за аперіодичним законом [30].

У першу чергу розглянемо налаштування за аперіодичним законом. При аперіодичному налаштуванні системи керування важливо привести передаточну функцію замкненого контуру до форми аперіодичної ланки, що необхідно для забезпечення необхідної реакції системи на керуючий сигнал.

Структурна схема системи підпорядкованого регулювання (СПР) зображена на рисунку 3.2.

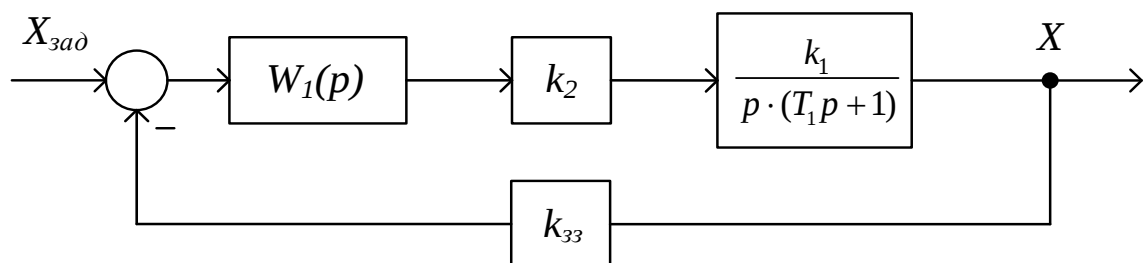


Рисунок 3.2 – Структурна схема СПР

На зазначеній схемі керуючий об'єкт представляється у вигляді з'єднання інтегратора та аперіодичної ланки. Сталу часу аперіодичної ланки зазначено як T_1 , k_1 – коефіцієнт аперіодичної ланки. Підсилювач представляється безінерційною ланкою з пропорційним коефіцієнтом k_2 . k_{33} – коефіцієнт зворотного зв'язку. $X_{зад}$ – заданий сигнал.

З метою досягнення аперіодичного налаштування контуру керування потрібно визначити передаточну функцію регулятора $W_1(p)$. Тому постає задача

вибрати регулятор, у якому в прямому каналі присутня інтегруюча ланка. Рівняння необхідної передаточної функції є наступним:

$$W_{\text{необх}}(p) = \frac{k_{\text{необх}}}{p} = W_1(p) \frac{k_1 \cdot k_1}{p \cdot (T_1 \cdot p + 1)}, \quad (3.1)$$

де $k_{\text{необх}}$ - необхідний коефіцієнт підсилення.

Як результат передаточна функція регулятора матиме наступний вигляд

$$W_1(p) = \frac{k_{\text{необх}}}{p} \frac{p \cdot (T_1 \cdot p + 1)}{k_1 k_2} = \frac{k_{\text{необх}}}{k_1 k_2} (T_1 \cdot p + 1). \quad (3.2)$$

Обрахунок передаточної функції замкненого контуру виконуємо за наступним рівнянням:

$$W_{\text{необх}}(p) = \frac{W_{\text{необх}}(p)}{1 + W_{\text{необх}}(p) \cdot k_{33}} = \frac{1}{W_{\text{необх}}^{-1}(p) + k_{33}}. \quad (3.3)$$

Підставивши $W_{\text{необх}}(p)$ у рівняння (3.3) у результаті отримаємо

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{1}{\frac{p}{k_{\text{необх}}} + k_{33}} = \frac{1/k_{33}}{\frac{1}{k_{33} k_{\text{необх}}} \cdot p + 1}. \quad (3.4)$$

Таким чином, контур налаштовано за аперіодичним законом. Значення необхідного коефіцієнта $k_{\text{необх}}$ визначає необхідну швидкодію контуру, забезпечуючи оптимальну реакцію системи на зміни керуючого сигналу.

Іншим методом налаштування контурів являється налаштування за модульним та симетричним оптимумами. Структурну схему системи підпорядкованого регулювання, що зображена на рисунку 3.2, щоб налаштувати на модульний оптимум, приведемо до наступного виду (рис. 3.3).

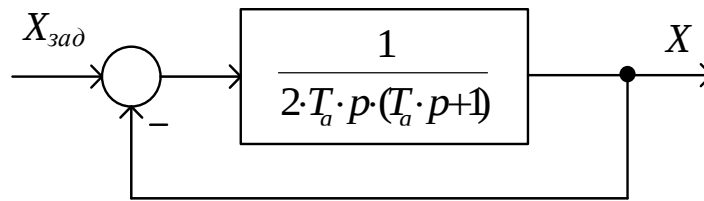


Рисунок 3.3 – Структурна схема замкнутого контуру СПР налаштованого на модульний оптимум

T_a на рис. 3.3 є довільною невеликою сталою часу.

Перехідна характеристика контуру під час налаштування на модульний оптимум матиме наступний вигляд (рис. 3.4).

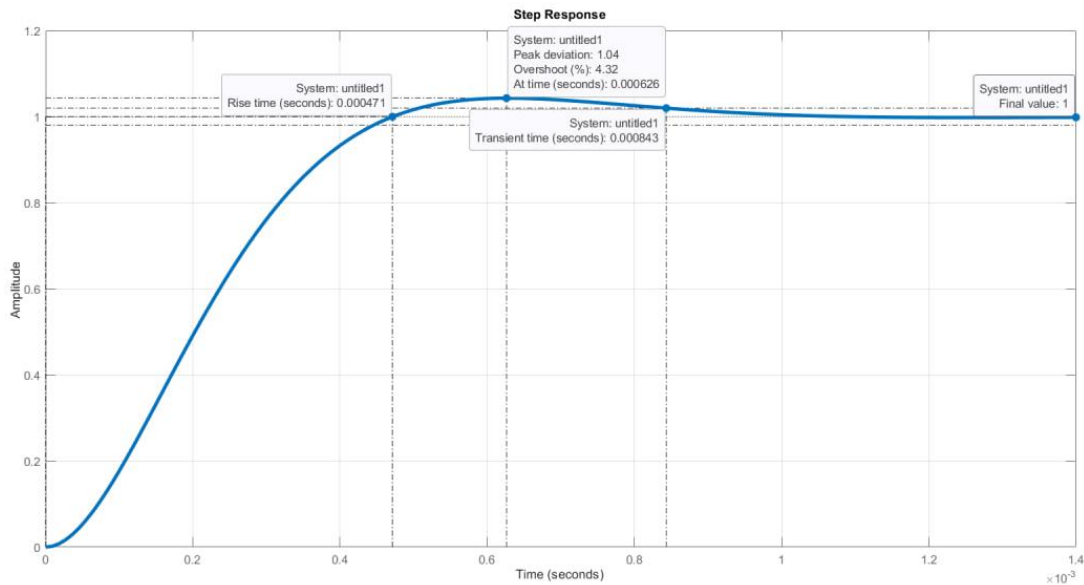


Рисунок 3.4 – Графік перехідного процесу під час налаштування на модульний оптимум

Налаштування на модульний оптимум застосовується в широкому спектрі систем автоматичного керування, де ставиться завдання забезпечити оптимальну динамічну реакцію на зміну вхідного сигналу [30].

Для контуру, що зображений на рис. 3.5 виконаємо налаштування на модульний оптимум. Відповідне налаштування проведемо в якості прикладу роботи модульного оптимуму.

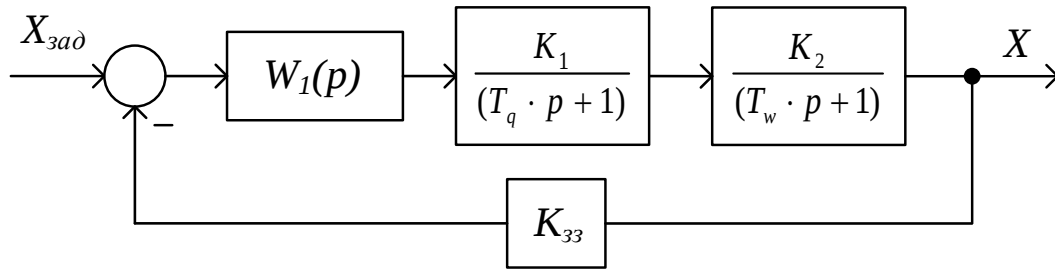


Рисунок 3.5 – Структурна схема при налаштуванні на модульний оптимум

Внутрішній контур T_q має більшу швидкодію ніж зовнішній контур T_w . K_i та T_i мають позитивні значення, тобто більші за 0.

Щоб полегшити аналіз і розрахунок передаточної функції регулятора, спростимо структурну схему налаштування на модульний оптимум до форми з одиничним зворотним зв'язком (рис. 3.6).

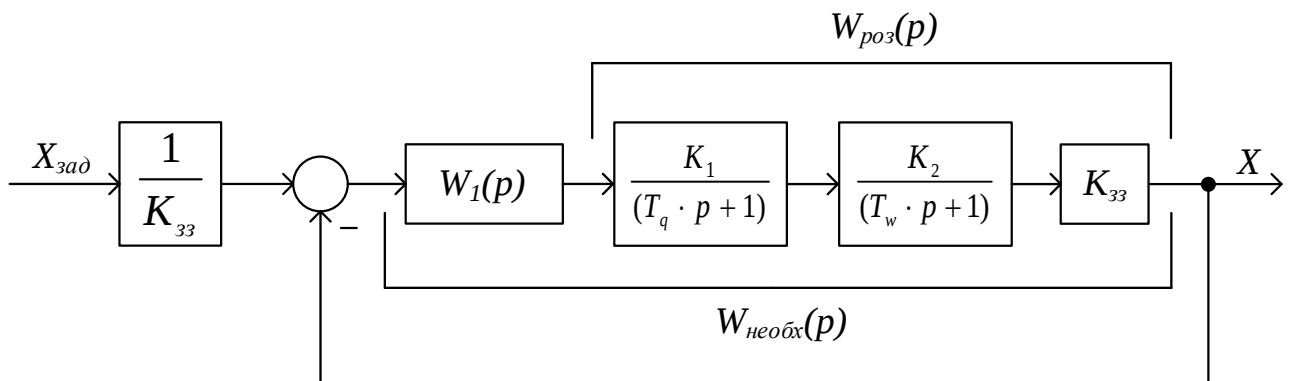


Рисунок 3.6 - Спрощена структурна схема контуру

Передаточна функція розімкненого контуру, без контролера матиме наступний вигляд

$$W_{роз}(p) = \frac{K_1}{T_q \cdot p + 1} \cdot \frac{K_2}{T_w \cdot p + 1} \cdot K_{33}. \quad (3.5)$$

Як результат необхідна передаточна функція корегованого контуру буде рівною

$$W_{необх}(p) = W_1(p) \cdot W_{роз}(p). \quad (3.6)$$

Прийнявши, те що $T_q = T_\mu$ - невелика постійна часу. Отже,

$$W_{необх}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_q \cdot p \cdot (T_q \cdot p + 1)}. \quad (3.7)$$

Обрахунок передаточної функції виконуємо за наступним виразом:

$$\begin{aligned} W_1(p) &= \frac{W_{необх}(p)}{W_{роз}(p)} = \frac{1}{2 \cdot T_q \cdot p \cdot (T_q \cdot p + 1)} \cdot \frac{(T_q \cdot p + 1) \cdot (T_w \cdot p + 1)}{K_1 \cdot K_2 \cdot K_{зз}} = \\ &= \frac{T_w \cdot p + 1}{2 \cdot T_q \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_{зз} \cdot p}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Щоб налаштувати систему на симетричний оптимум, структурну схему контуру керування, що зображена на рисунку 3.2 слід перетворити до форми, наведеної на рисунку 3.7 [30].

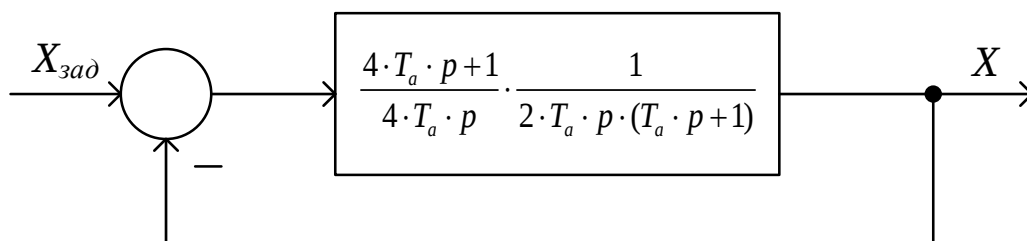


Рисунок 3.7 - Структурна схема замкнутого контуру СПР налаштованого на симетричний оптимум

Графік перехідного процесу під час налаштування на симетричний оптимум з перегулюванням 43 % зображено на рисунку 3.8.

Симетричний оптимум – це метод налаштування контурів керування, який забезпечує нульову статичну похибку та швидкий перехід до заданого значення. Він широко використовується завдяки своїй простоті, ефективності та стійкості. Поєднання аперіодичної ланки та інтегратора призводить до отримання пропорційно-інтегрального *PI*-регулятора.

Перевагою налаштування на симетричний оптимум є відсутність статичної похибки. Недолік відповідного налаштування – це знижена якість перехідних процесів під час відпрацювання ступінчастої вхідної дії [30].

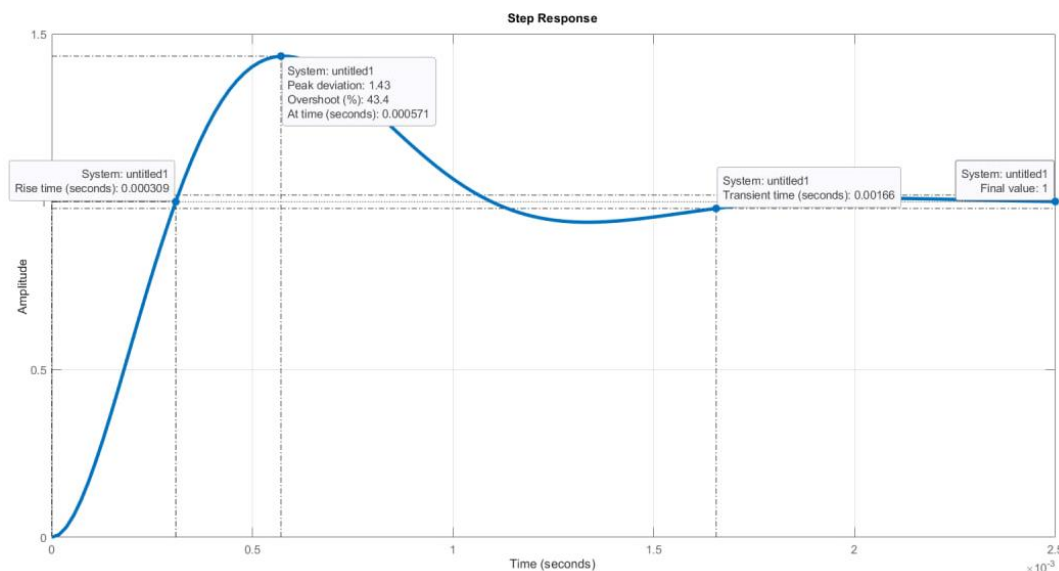


Рисунок 3.8 - Графік перехідного процесу під час налаштування на симетричний оптимум

У висновку визначимо основні переваги використання систем підпорядкованого регулювання. По-перше, відсутність складності у визначенні передаточних функцій регуляторів. По-друге, легкі та зручні методи розрахунку контурів систем підпорядкованого регулювання. По-третє, можливість налаштування кожного рівня окремо.

3.3 Двоконтурна система підпорядкованого керування з паралельним вмиканням регуляторів напруги в системах накопичення електричної енергії

Відповідно до законів Кірхгофа запишемо рівняння під час режиму заряджання акумуляторної батареї, коли ключ $S1$ увімкнено, а $S2$ вимкнено:

$$\begin{aligned} CR_C \frac{du_C}{dt} + u_C &= u_{dc}; \\ \frac{L}{R_B + R_L} \frac{di_L}{dt} + i_L &= \frac{u_{dc} - E_B}{R_B + R_L}; \\ C \frac{du_C}{dt} &= i_{dc} - i_{load}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Запишемо рівняння для режиму роботи перетворювача під час циклу розряджання акумулятора:

$$\begin{aligned} \frac{L}{R_B + R_L} \frac{di_L}{dt} + i_L &= \frac{E_B - u_{dc} / 2}{R_B + R_L}; \\ R_C \cdot C \frac{du_C}{dt} + u_C &= u_{dc}; \\ C \frac{du_C}{dt} &= i_G - i_{load} - i_{dc}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

На рисунку 3.9 зображена структурна схема СПР напругою навантаження.

Визначимо коефіцієнти 2-х PI -регуляторів: струму та напруги СНЕ для режиму розряджання АБ.

Проведемо обрахунок еквівалентного активного опору у вітці з АБ та R_2L -фільтром:

$$\sum R = R_L + R_B = 0.05 + 0.0048 = 0.0548 \text{ (Ом)}. \quad (3.11)$$

Індуктивність R_2L -фільтра рівна $L = 5.76 \cdot 10^{-4}$ (Гн).

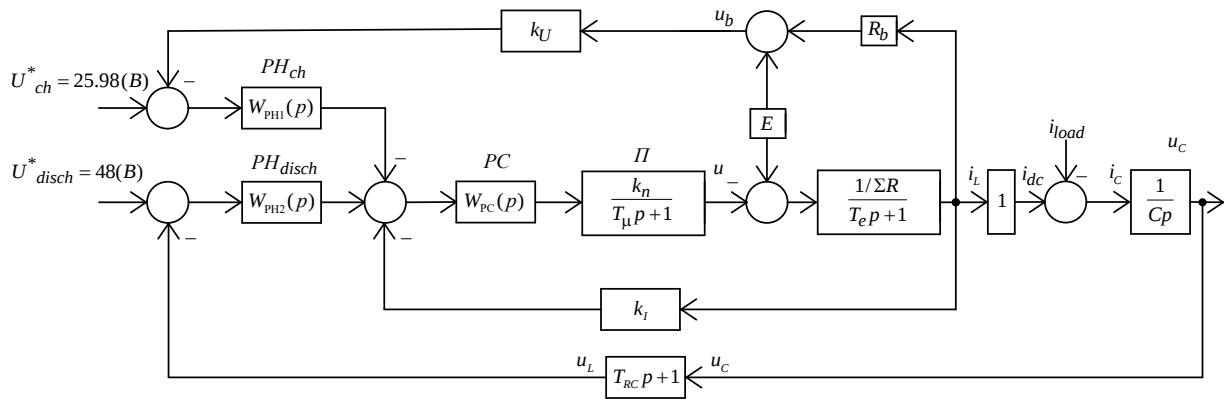


Рисунок 3.9 – Структурна схема СПР напругою навантаження

Виконаємо розрахунок сталої часу об'єкту в ході циклу розрядження акумулятора

$$T_b = \frac{L}{\sum R} = \frac{5.76 \cdot 10^{-4}}{0.0548} = 0.0105 \text{ (с)}. \quad (3.12)$$

Визначимо сталу часу $DC-DC$ перетворювача

$$T_\mu = T_{PWM} = T_{PWM} = 0.0001 \text{ (с)}. \quad (3.13)$$

Розрахуємо коефіцієнт підсилення перетворювача k_n

$$k_n = \frac{u_{dc}}{0.95} = \frac{48}{0.95} = 50.5263. \quad (3.14)$$

Обрахуємо сталу часу у зворотному зв'язку по напрузі

$$T_{RC} = R_1 \cdot C = 0.001 \cdot 0.001 = 0.000001 \text{ (с)}. \quad (3.15)$$

Впливом електрорушійної сили джерела енергії E_B знехтуємо.

Логарифмічна-амплітудна характеристика (ЛАХ) при налаштуванні розімкнутого контуру на модульний оптимум буде мати вигляд, як відображено на рисунку 3.10.

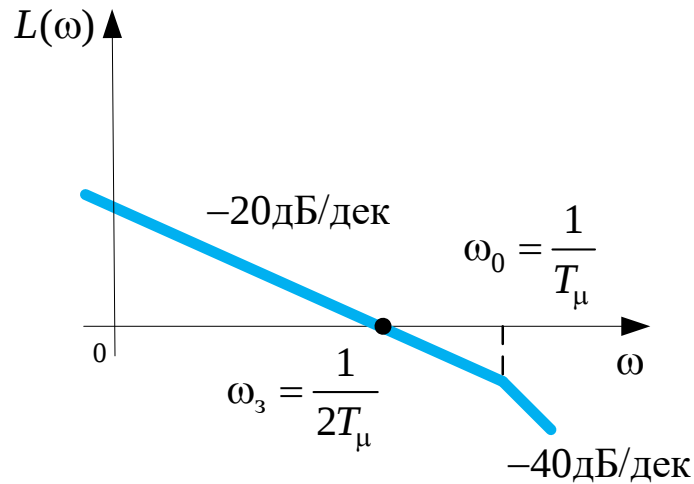


Рисунок 3.10 – ЛАХ при налаштуванні розімкнутого контуру на модульний оптимум

Виконаємо розрахунок передаточної функції пропорційно-інтегрального регулятора струму

$$\begin{aligned}
 W_{PC}(p) &= \frac{W_{\text{баз}}(p)}{W_{\text{роз}}(p)} = \frac{1}{2T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)} \cdot \frac{(T_{\mu} p + 1)}{k_n} \cdot \frac{T_b p + 1}{\sum R} \cdot \frac{1}{k_I} = \\
 &= \frac{T_b \sum R}{2T_{\mu} k_n k_I} \cdot \frac{T_b p + 1}{T_b p} = k_{PC} \frac{T_{PC} p + 1}{T_{PC} p} = k_{PC} + k_{PC} \frac{1}{T_b p}; \\
 T_{PC} &= T_b; \\
 k_{PC} &= \frac{T_b \sum R}{2T_{\mu} k_n k_I} = \frac{0.0105 \cdot 0.0548}{2 \cdot 0.0001_{\mu} \cdot 50.5263 \cdot 1} = 0.057; \\
 k_{IC} &= k_{PC} \frac{1}{T_b} = \frac{T_b \sum R}{2T_{\mu} k_n k_I} \cdot \frac{1}{T_b} = \frac{0.0548}{2 \cdot 0.0001_{\mu} \cdot 50.5263 \cdot 1} = 5.4229.
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Використовуючи програмне середовище MATLAB Simulink змодельовано реакцію внутрішнього контуру на стрибок 10 А (рис. 3.11).

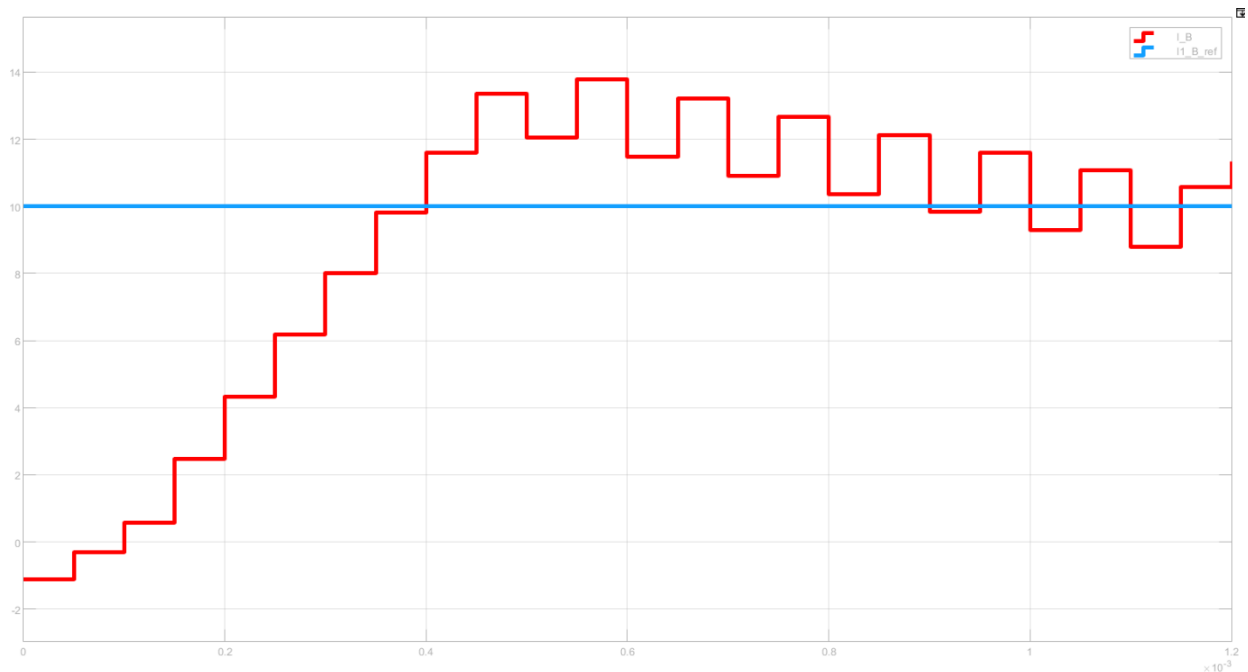


Рисунок 3.11 - Динамічна характеристика контуру струму при налаштуванні на модульний оптимум

У таблиці 3.1 представлені показники якості налаштованого контуру струму акумуляторної батареї на модульний оптимум.

Таблиця 3.1 – Показники якості керування контуру струмом АБ

Час наростання $t_n, t/T_{\mu min}$	Час регулювання при $2 \% t_p, t/T_{\mu min}$	Перерегулювання $\sigma = \frac{\Delta I_{max}}{I_{уст}} 100\%$
4	9	3.8

ЛАХ при налаштуванні розімкнутого контуру на симетричний оптимум зображено на рисунку 3.12.

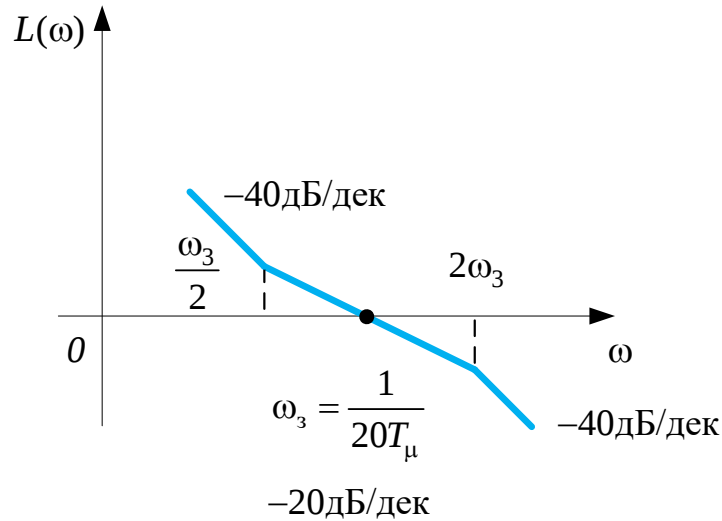


Рисунок 3.12 - ЛАХ при налаштуванні розімкнутого контуру напруги на симетричний оптимум

Налаштувавши контур напруги на симетричний оптимум у результаті отримуємо *PI*-регулятор:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{PHI}}(p) &= \frac{W_{\text{баз}}(p)}{W_{\text{роз}}(p)} = \frac{4T_v p + 1}{4T_v p} \frac{W_{\text{базМО}}(p)}{W_{\text{роз}}(p)} = \\
 &= \frac{4T_v p + 1}{4T_v p} \frac{1}{2T_v \cancel{p} (T_v p + 1)} \frac{(T_v p + 1) \cancel{C \cdot p} \cdot k_I}{1 \cdot k_U} = k_{\text{PHI}} \frac{T_{\text{PHI}} p + 1}{T_{\text{PHI}} p} = \\
 &= k_{\text{PHI}} + k_{\text{PHI}} \frac{1}{T_{\text{PHI}} p} = \frac{C \cdot k_I}{2T_v k_U} + \frac{C \cdot k_I}{8(T_v)^2 k_U} \frac{1}{p}; \quad (3.17) \\
 T_v &= 20 \cdot T_\mu; T_{\text{PHI}} = 4T_v; \\
 k_{\text{PHI}} &= \frac{C \cdot k_I}{2T_v k_U} = \frac{0.001 \cdot 1}{2 \cdot 0.002 \cdot 1} = 0.25; \\
 k_{\text{IH1}} &= \frac{C \cdot k_I}{8(T_v)^2 k_U} = \frac{0.001 \cdot 1}{8 \cdot (0.002)^2 \cdot 1} = 31.25.
 \end{aligned}$$

Коефіцієнти *PI*-регулятора напруги під час зарядження АБ визначаються за аналогічною процедурою при налаштуванні контуру напруги на симетричний оптимум та дорівнюють:

$$\begin{aligned}
W_{\text{PH1}}(p) &= \frac{W_{\text{баз}}(p)}{W_{\text{роз}}(p)} = \frac{4T_v p + 1}{4T_v p} \frac{W_{\text{базМО}}(p)}{W_{\text{роз}}(p)}; \\
T_v &= 2T_\mu; T_{\text{PH2}} = 4T_v; \\
k_{\text{PH2}} &= 2.5; \\
k_{\text{IH2}} &= 3125.
\end{aligned}
\tag{3.18}$$

3.4 Перехідні процеси в системі накопичення електроенергії при різних типах акумуляторних батарей

Розглянемо динамічні та статичні характеристики СНЕ при використанні різних типів акумуляторних батарей, а саме: свинцево-кислотний, нікель-кадмієвий NiCd та літій-іонний Li-ion за допомогою програми MATLAB.

Імітаційні моделі систем накопичення електроенергії, розроблені за допомогою бібліотечного блоку SimPowerSystems для різних типів акумуляторів, наведені на рисунку 3.13.

На рисунку 3.14 зображено математичну модель СНЕ з літій-іонною акумуляторною батареєю у пакеті прикладних програм Simulink.

У таблиці 3.2 представлені параметри, номінальний та рекомендований струми розрядження/зарядження акумуляторних батарей.

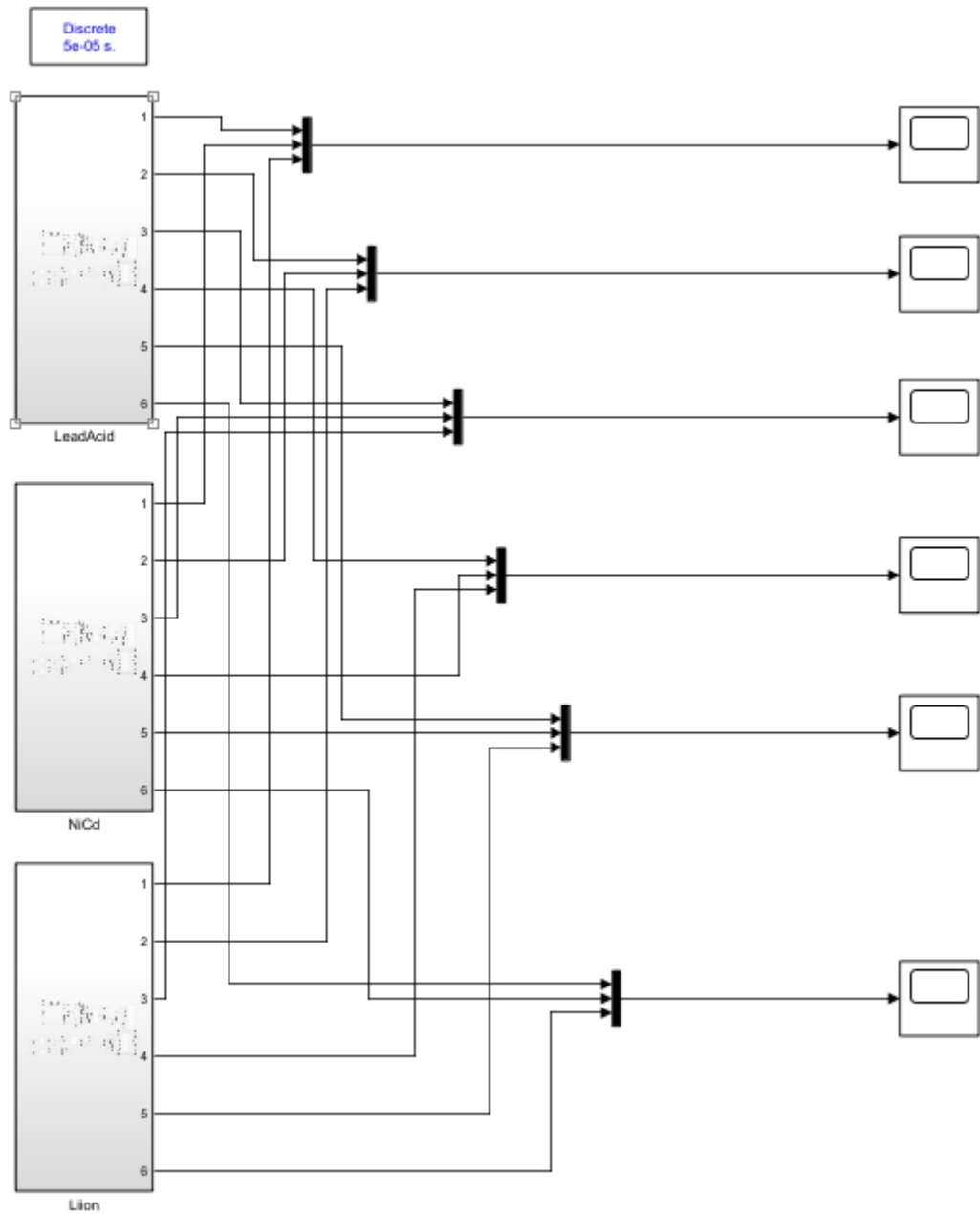


Рисунок 3.13 – Імітаційні моделі систем накопичення електричної енергії

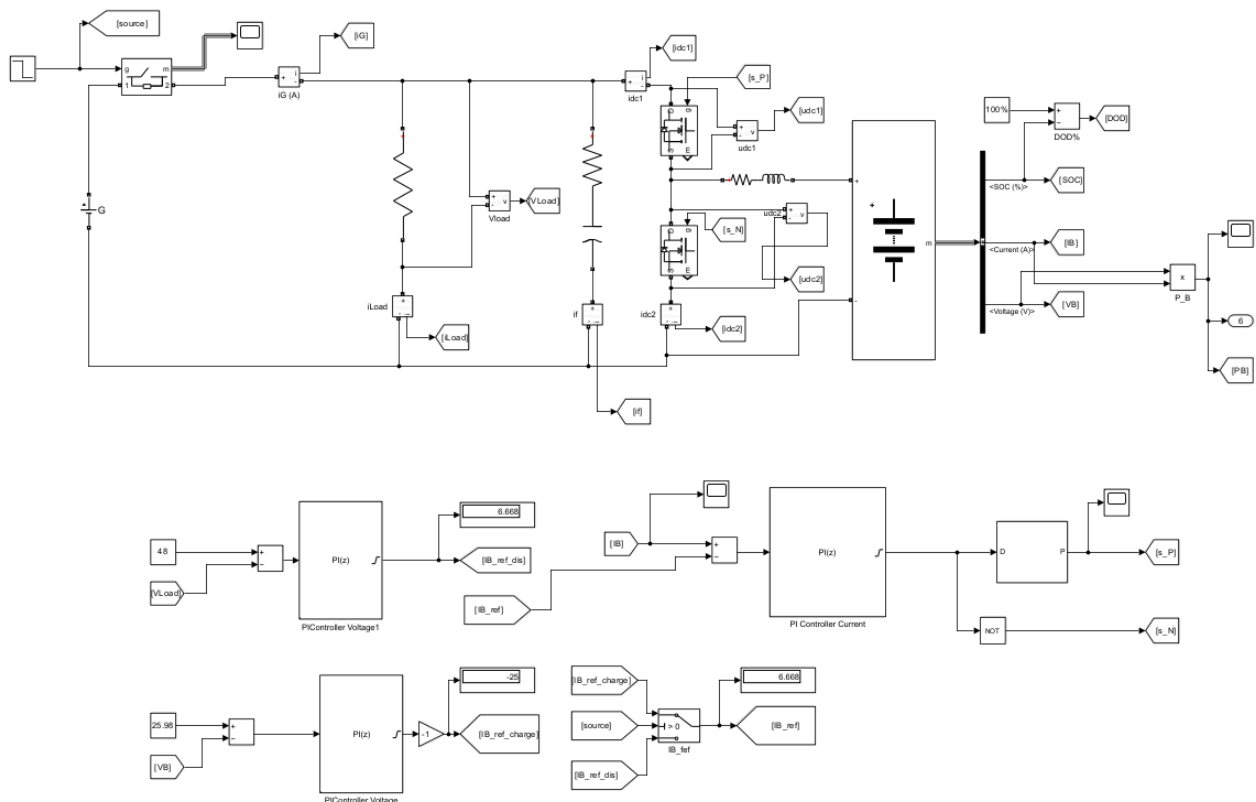


Рисунок 3.14 – Математична модель СНЕ з Li-ion акумуляторною батареєю

Таблиця 3.2 – Параметри, номінальний та рекомендований струми АБ

Тип акумулятора	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$C, \text{А} \cdot \text{год}$	$R_{\text{вн}}, \text{Ом}$	$U_{\text{зар.100\%}}, \text{В}$	$U_{\text{зар.80\%}}, \text{В}$	$I_{\text{роз.ном}}, \text{А}$	$I_{\text{зар.}}, \text{А}$
Свинцево-кислотний	24	50	0.0048	26.18	24.36	10	5
NiCd	24	50	0.0048	27.50	25.80	10	5
Li-ion	24	50	0.0048	28	25.98	22	25

Моделювання роботи акумуляторних батарей проводимо при заданих струмах заряджання/розряджання (табл. 3.2) та встановленому стані заряду акумулятора $\text{SoC}=50\%$. Задані параметри СНЕ: опір навантаження $R_{\text{н}}=15 \text{ Ом}$; опір та ємність RC -фільтра $R_1=1 \text{ мОм}$, $C=1000 \text{ мкФ}$; опір та індуктивність RL -фільтра $R_2=20 \text{ мОм}$, $L=0.576 \text{ мГн}$. Час моделювання дорівнює 7 с.

Алгоритм виконання дослідження:

1. Початковий момент часу при $t=0$, подається завдання напруги зарядження АБ у вигляді ступінчастої функції ($U_{н.х}$ при $SoC=80\%$).
2. У момент часу $t=2.5$ с відбувається стрибкоподібний перехід від режиму зарядження до режиму розрядження при заданій напрузі на навантажені $U_n=48$ В.

На рисунку 3.15 зображено графіки стану заряду акумуляторів SoC , на якому видно, що найбільше значення SoC спостерігається в Li-ion акумуляторі. SoC в NiCd та свинцево-кислотної батареї, під час процесу зарядження, мають близькі значення рівня заряду (50.006 % (NiCd) та 50.0055 % (свинцево-кислотний)). Проте під час процесу розрядження SoC NiCd та свинцево-кислотного акумуляторів, для моменту часу $t=3.5$ с, мають рівні значення, а для інтервалу часу від 3.5 с до 7 с SoC NiCd стає більшим за SoC свинцево-кислотної батареї на 0.003 %.

SoC Li-ion, при $t=7$ с рівний 50.001 % і є більшим за SoC NiCd та свинцево-кислотного акумуляторів.

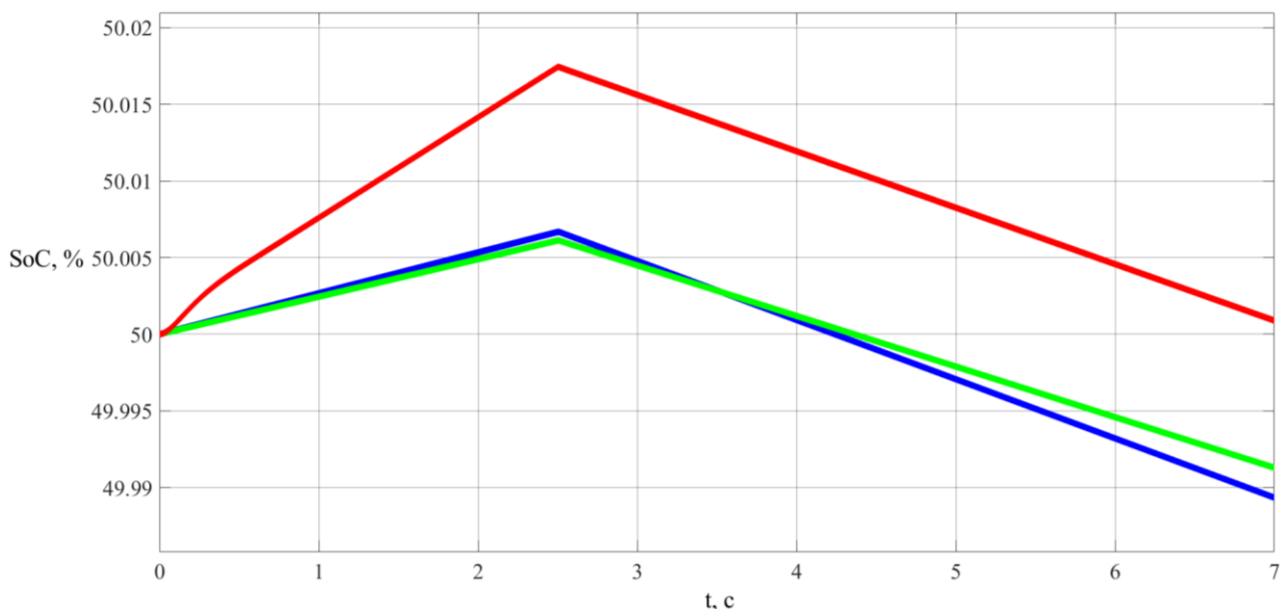


Рисунок 3.15 - Графіки стану заряду акумуляторів SoC (синій – свинцево-кислотний, зелений – NiCd, червоний – Li-ion)

На рисунку 3.16 зображено графіки глибини розряду акумуляторів DoD.

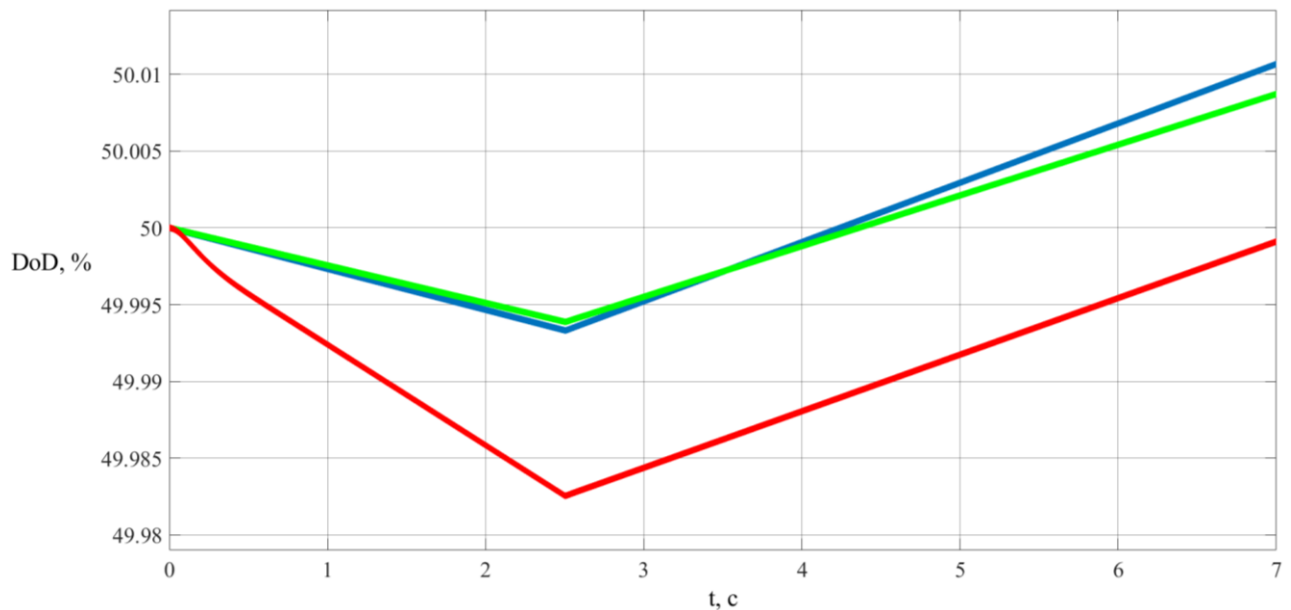


Рисунок 3.16 – Графік глибини розряду акумуляторів DoD (синій – свинцево-кислотний, зелений – NiCd, червоний – Li-ion)

З рисунку 3.16 видно, що відсоток ємності акумулятора, що застосовується під час режимів заряду/розряду DoD для свинцево-кислотного має найбільше значення (50.011 %). Як наслідок з розглянутого типу акумулятора було вилучено більший відсоток енергії. NiCd акумулятор має менше значення DoD (50.008 %), але найменше значення DoD має літій-іонний акумулятор (49.998 %).

На рисунок 3.17 зображено графіки заданого значення струму заряджання/розряджання АБ.

Струм заряджання Li-ion акумулятора становить 11.8 А. Максимальне відхилення струму заряджання $\Delta I_{\text{зад}}$ від усталеного значення під час перехідного процесу дорівнює 8.29 А. Відхилення струмів заряджання від усталених значень в NiCd та свинцево-кислотному акумуляторах відсутні, так як регулятор знаходиться у зоні обмеження. Струм розряджання свинцево-кислотного акумулятора є найбільшим серед розглянутих, значення якого дорівнює 7.4 А. Максимальне відхилення струму розряджання свинцево-кислотного

акумулятора рівне 1.43 А. Струм розрядження NiCd акумулятора дорівнює 6.75 А, а максимальне відхилення рівне 1.85 А. У Li-ion батареї усталене значення струму розрядження становить 6.65 А, максимальне відхилення дорівнює 2 А. Найменше усталене значення струму розрядження має літій-іонна батарея, що є перевагою такого акумулятора над іншими типами.

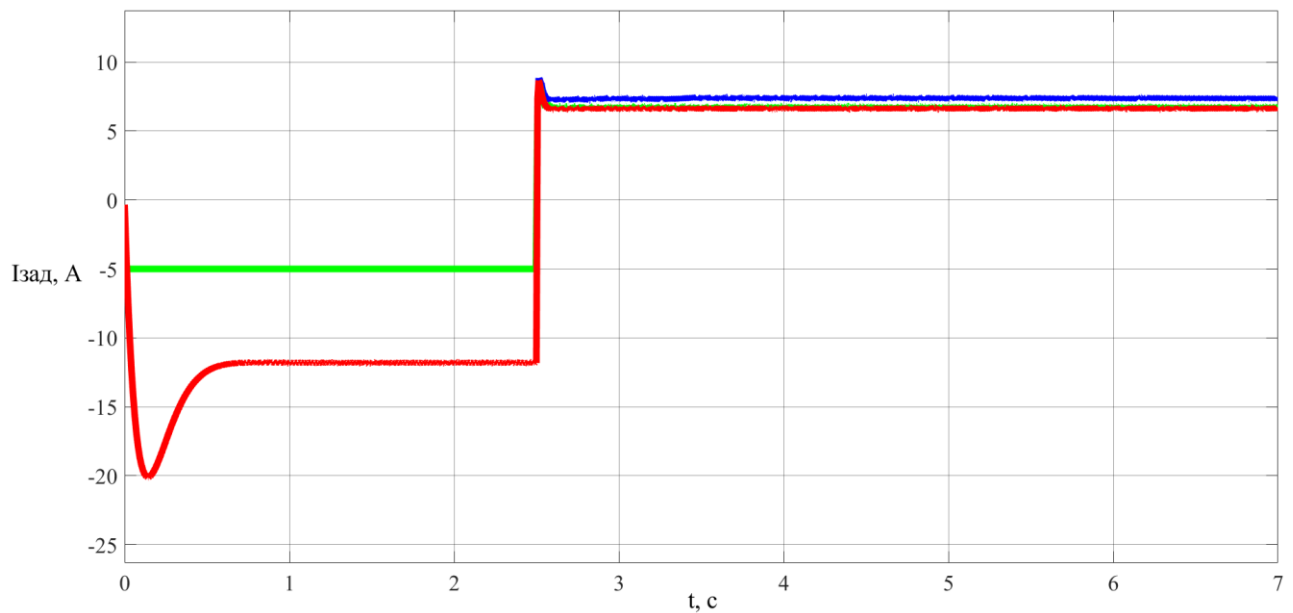


Рисунок 3.17 - Графіки заданих значень струмів заряду/розряду $I_{\text{зад}}$ для 3-х типів АБ (синій – свинцево-кислотний, зелений – NiCd, червоний – Li-ion)

На рисунку 3.18 зображені графіки миттєвих значень струмів батарей у режимах зарядження й розрядження.

У струмах різних типів батарей під час заряджання/розряджання присутні пульсації прямокутних форм. Коефіцієнт пульсацій у струмі зарядження $K_{\text{Пз}}$ свинцево-кислотного акумулятора дорівнює

$$K_{\text{Пз}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} = \frac{8.15 - 2.27}{8.15 + 2.27} = 0.564, \quad (3.19)$$

де I_{max} – максимальне значення струму, А;

I_{min} – мінімальне значення струму, А.

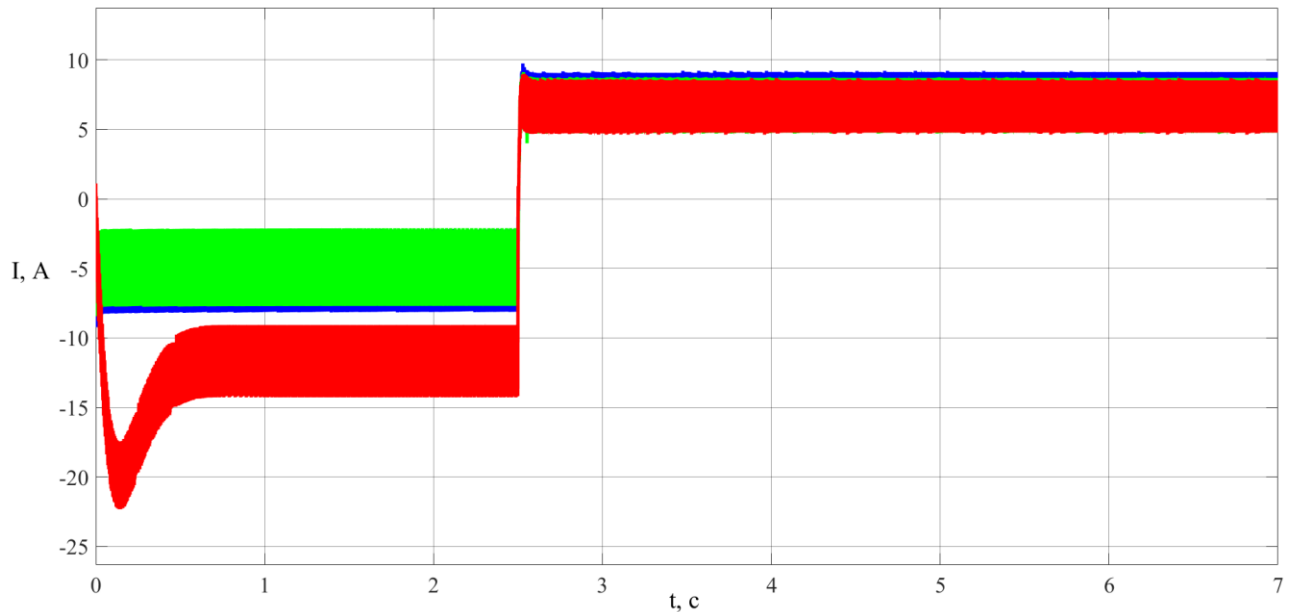


Рисунок 3.18 – Графіки струмів заряджання та розряджання I акумуляторних батарей (синій – свинцево-кислотний, зелений – NiCd, червоний – Li-ion)

Відповідно до формули (3.19) визначаємо коефіцієнти пульсацій у струмах $K_{\text{Пз}}$ заряджання для NiCd та Li-ion акумуляторів. $K_{\text{Пз}}$ для NiCd дорівнює 0.554. $K_{\text{Пз}}$ для Li-ion дорівнює 0.219.

Визначимо коефіцієнти пульсації струмів $K_{\text{Пр}}$ під час режиму розряджання АБ. $K_{\text{Пр}}$ для свинцево-кислотного акумулятора становить 0.266, для NiCd 0.293, для Li-ion 0.283. Як можна побачити свинцево-кислотний акумулятор має найменше значення $K_{\text{Пр}}$.

На рисунку 3.19 зображено графіки перехідних процесів напруги під час зарядження/розрядження АБ.

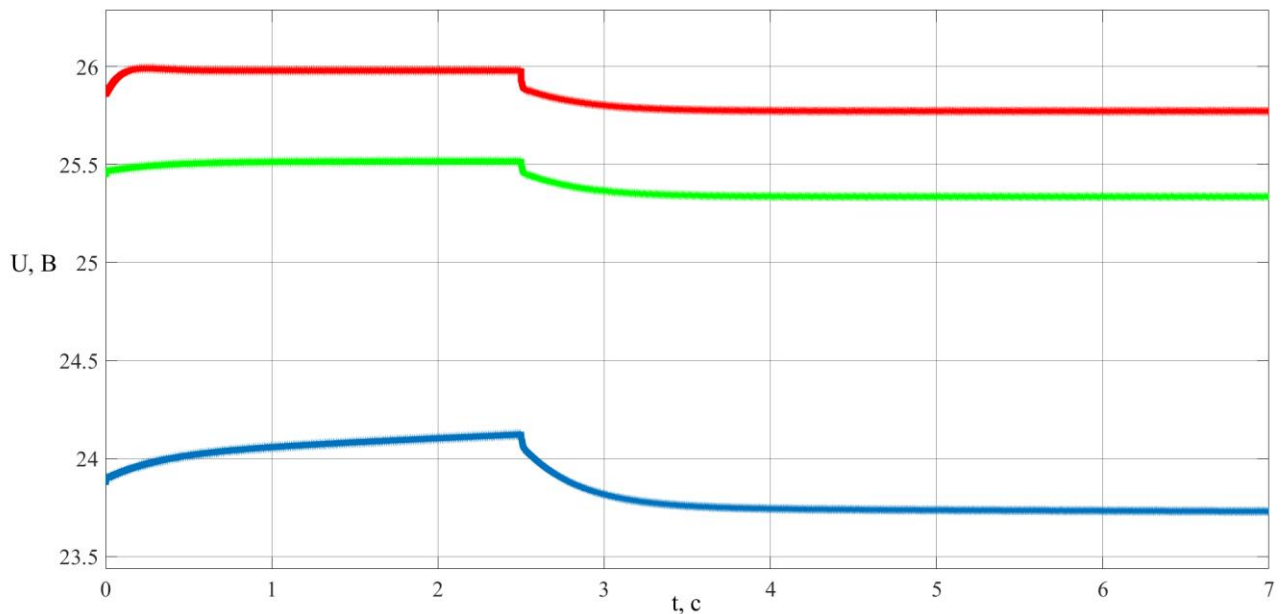


Рисунок 3.19 – Графіки напруг заряджання та розряджання акумуляторних батарей (синя – свинцево-кислотний, зелена – NiCd, червона – Li-ion)

Напруга неробочого ходу акумуляторів має різне значення: свинцево-кислотний – 24.36 В; NiCd – 25.80 В; Li-ion – 25.98 В. Максимальна прикладена напруга заряджання для: свинцево-кислотної батареї – 24.12 В; NiCd – 25.52 В; Li-ion – 25.98 В. У момент часу $t=7$ с напруга на затискачах батареї у режимі розрядження: свинцево-кислотна – 23.72 В, NiCd – 25.34 В, Li-ion – 25.77 В.

Виконаємо розрахунок коефіцієнту пульсації $K_{\text{пр}}$ напруги акумулятора в режимі розряджання за формулою:

$$K_{\text{пр}U} = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{max}} + U_{\text{min}}}, \quad (3.20)$$

де U_{max} – максимальне значення напруги, В;

U_{min} – мінімальне значення напруги, В.

Коефіцієнт пульсації $K_{\text{пр}U}$ для: свинцево-кислотного – $4.21 \cdot 10^{-4}$, NiCd – $3.16 \cdot 10^{-4}$, Li-ion – $3.88 \cdot 10^{-4}$. NiCd акумулятор має найменше значення коефіцієнта пульсацій.

На рисунку 3.20 зображено графік напруг на навантаженні.

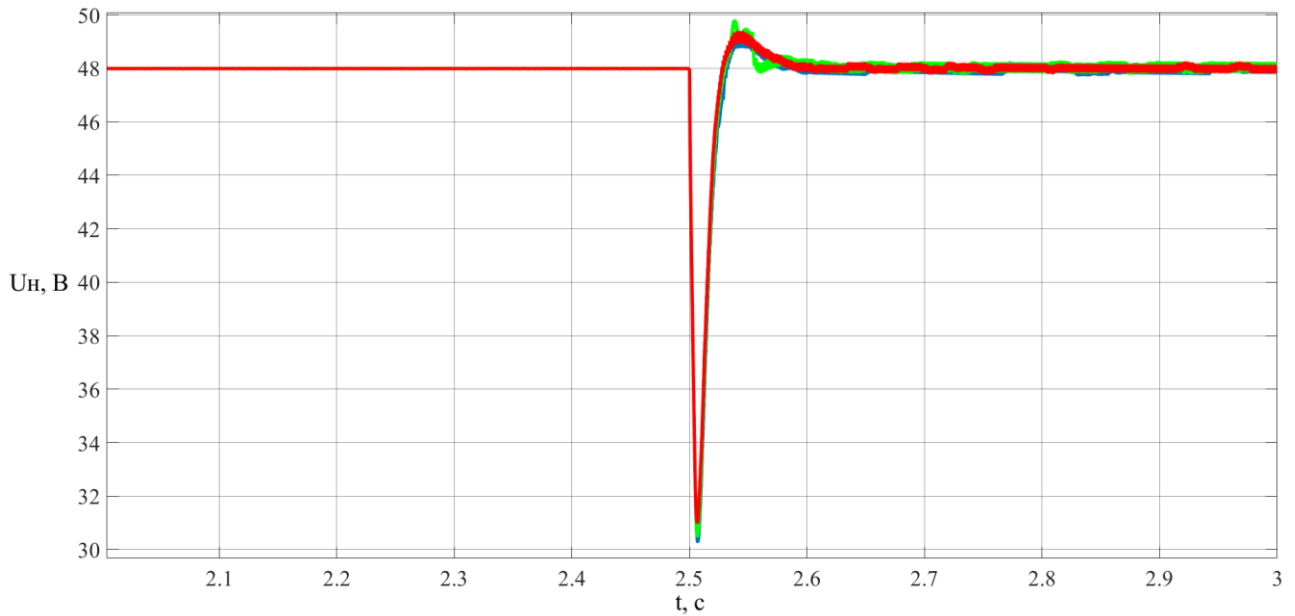


Рисунок 3.20 – Графік напруг навантаження СНЕ (синя – свинцево-кислотний, зелена – NiCd, червона – Li-ion)

Максимальне відхилення напруги навантаження ΔU_{nmax} від усталеного значення (48 В) при перехідному процесі ($t=2.5$ с): свинцево-кислотний – 17.75 В, NiCd – 17.54 В, Li-ion – 17.03 В. Відхилення напруги ΔU_n від усталеного значення при перехідному процесі: свинцево-кислотний – 0.9 В, NiCd – 1.74 В, Li-ion – 1.1 В.

Виконаємо розрахунок коефіцієнту пульсації K_{PrU_n} напруги навантаження для режиму розряджання акумулятора за формулою:

$$K_{PrU_n} = \frac{U_{max\ n} - U_{min\ n}}{U_{max\ n} + U_{min\ n}}, \quad (3.21)$$

де $U_{max\ n}$ – максимальне значення напруги навантаження, В;

$U_{min\ n}$ – мінімальне значення напруги навантаження, В.

Коефіцієнт пульсації K_{PrU_n} для: свинцево-кислотного – $3.54 \cdot 10^{-3}$, NiCd – $4.48 \cdot 10^{-3}$, Li-ion – $3.23 \cdot 10^{-3}$. Отже, Li-ion акумулятор має найменший коефіцієнт пульсацій у напрузі навантаження.

На рисунку 3.21 зображено графіки потужності акумуляторних батарей.

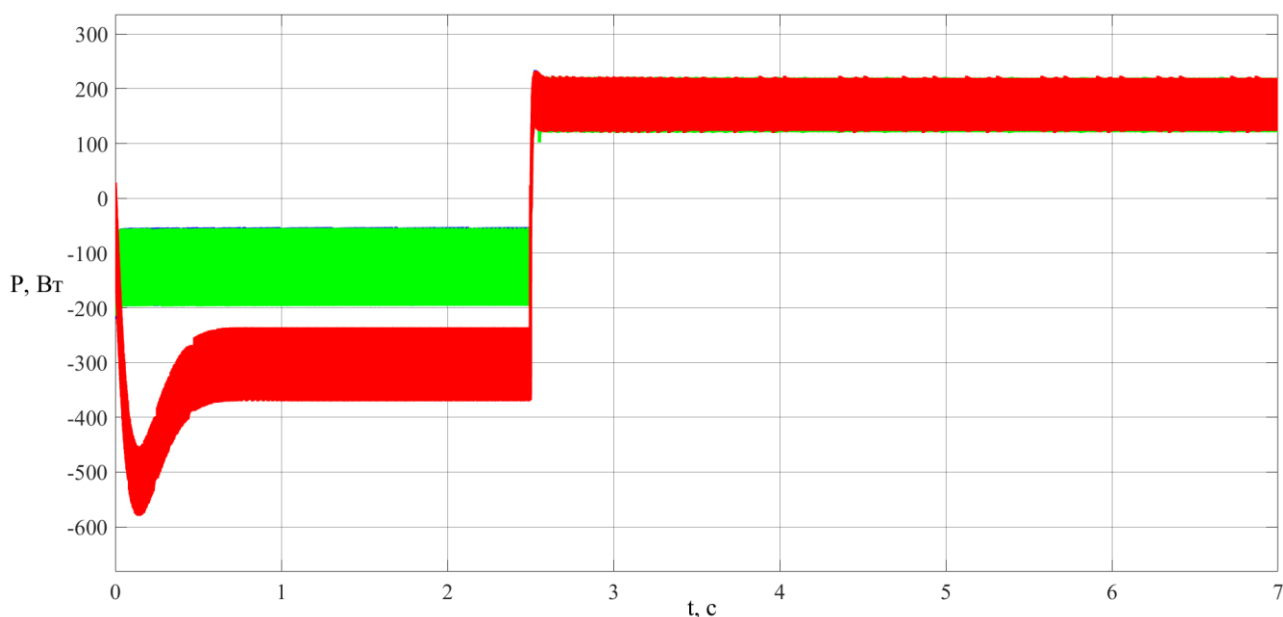


Рисунок 3.21 – Графіки потужності P акумуляторних батарей (синя крива – свинцево-кислотний, зелена крива – NiCd, червона крива – Li-ion)

З рисунку 3.21 видно, що активна потужність усіх типів акумуляторних батарей у режимі розрядження становить близько 170 Вт.

Висновки до третього розділу

Розглянуто СНЕ та принцип її роботи, до складу якої входить реверсивний *DC-DC* перетворювач напруги, який забезпечує двосторонню передачу енергії завдяки електронним ключам, які керуються за допомогою регуляторів.

Для керування напругами на навантаженні та струмами заряду/розряду АБ було використано систему підпорядкованого регулювання з паралельним вмиканням регуляторів напруги.

Застосовано типові налаштування СПР контурів на основі методів налагодження за симетричним та модульним оптимумами, що забезпечують перерегулювання на 43 % та 4.3 % відповідно.

На основі законів Кірхгофа представлено рівняння для режимів зарядження/розрядження АБ в СНЕ.

Проведено розрахунок параметрів електричної схеми СНЕ для визначення параметрів регуляторів. Показники якості керування струмом АБ були перевірені за допомогою математичного моделювання.

Здійснено аналіз перехідних та усталених процесів в СНЕ при різних типах АБ за допомогою розробленої імітаційної моделі. У дослідженні використано три найбільш поширені типи батарей: свинцево-кислотний, нікель-кадмієвий та літій-іонний. Номінальна напруга, ємність та внутрішній активний опір всіх типів акумуляторних батарей мають однакові значення.

Найбільше значення SoC за період 7 с спостерігається в Li-ion акумулятора, що дорівнює 50.001 %. Отже, Li-ion акумулятор має більший залишок електроенергії, яка є доступна в комірці батареї.

Серед усіх типів акумуляторів DoD свинцево-кислотного акумулятора має найбільше значення 50.011 %, а найменше значення (49.998 %) є у Li-ion акумулятора.

Найбільший струм розрядження має свинцево-кислотний акумулятор – 7.4 А, а найменший струм розряду має Li-ion батарея – 6.65 А. Але найменше максимальне відхилення струму під час розрядження має свинцево-кислотний акумулятор – 1.43 А.

У струмах та напругах СНЕ присутні пульсації прямокутної форми. Під час розрядження свинцево-кислотного акумулятора коефіцієнт пульсацій струму $K_{\text{пр}}$ є найменший (0.266).

Найменший коефіцієнт пульсації напруги АБ $K_{\text{пр}U}$ у нікель-кадмієвого акумулятора – $3.16 \cdot 10^{-4}$.

Перевагою літій-іонного акумулятора є найменше значення максимального відхилення напруги навантаження від усталеного значення, який дорівнює 17.03 В. Також перевагою Li-ion акумулятора є найменше значення $K_{\text{пр}U}$ – $3.23 \cdot 10^{-3}$. Але відхилення напруги при динамічному процесі найменше у свинцево-кислотної батареї – 0.9 В.

Потужність під час процесу розрядження для розглянутих акумуляторів мають рівні значення (170 Вт).

Характеристики наведених типів батарей під час дослідження показали, те що Li-ion акумулятор є найкращим вибором для СНЕ.

4 РОЗРОБКА ПОКРАЩЕНОЇ СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Система накопичення електричної енергії на основі електрохімічної технології є нелінійним об'єктом керування параметри якого не є сталими. Електрична енергія у запропонованих системах зберігається в акумуляторних батареях. Параметри батареї залежать від температури навколишнього середовища, стану заряду та частоти струмів, що пов'язані широтно-імпульсною модуляцією [1]. Також до складу системи накопичення входять перетворювачі, які використовуються для зміни значення та стабілізації постійної напруги. Перетворювач напруги теж є нелінійною ланкою.

Невизначеність математичної моделі об'єкта керування впливає на якість регулювання електричними координатами електрохімічної системи та її енергетичні показники.

Розв'язати наведену проблему можна за допомогою використання алгоритмів керування, які базуються на концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією миттєвих функціоналів енергії руху без використання додаткових законів ідентифікації [31].

4.1 Основи концепції зворотних задач динаміки в сполученні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих енергій руху

При використанні концепції зворотних задач динаміки застосовується наступне диференціальне рівняння з метою завдання необхідної якості керування:

$$\frac{d^p o}{dt^p} + \sum_{i=0}^{(p-1)} h_i \frac{d^i o}{dt^i} = \sum_{j=0}^r m_j \frac{d^j c^*}{dt^j}, \quad (4.1)$$

де c – координата керуючої функції;

h_i – коефіцієнт, який визначає характер перехідного процесу;

m_j – коефіцієнт, що визначає час перехідного процесу;

o – вихідна координата.

Параметри якості керування, такі як: тривалість наростання, час регулювання, перерегулювання, залежність коефіцієнтів h_i та m_j встановлюються при застосуванні різних методів, один з яких кореневий [32]. Порядок лівої частина рівняння (4.1) повинен бути більшим чи рівним правому, тобто ($p \geq r$).

Щоб описати об'єкти регулювання локальних контурів системи використовуємо рівняння (4.2):

$$\frac{d^{p_l} c}{dt^{p_l}} = \sum_{k=0}^{r_r} b_k \frac{d^k l}{dt^k} - \sum_{i=0}^{(p_l-1)} a_i \frac{d^i c}{dt^i}, \quad (r_r \leq p_l - 1), \quad (4.2)$$

де l – це керуюча функція об'єкту;

r_r – порядок правої частини рівняння;

p_l – порядок лівої частини рівняння;

c – керована координата об'єкту;

a_i, b_k - коефіцієнти рівняння.

Функція Ляпунова (4.3) для системи що замкнута, використовується для оцінки ступеню наближення дійсного процесу керування до необхідного

$$G(l(t)) = \frac{1}{2} \left[\frac{d^p o}{dt^p} - \frac{d^{p_l} c}{dt^{p_l}} \right]^2. \quad (4.3)$$

Під час знаходження керуючої функції l , абсолютний мінімум функціоналу обраховують за наступною формулою:

$$\min_l G(l(t)) = 0. \quad (4.4)$$

Відхилення значень параметрів об'єкту від знайдених значень, що були отримані з алгоритмів керування компенсаційного типу веде до зниження якості керування [33, 34]. Використання цього алгоритму потребує знання всіх параметрів об'єкту керування (4.2). Щоб покращити якість керування необхідно

прийняти умову (4.3), але умовою (4.4) потрібно знехтувати. У результаті потрібно виконати мінімізацію функціонала за градієнтним законом 1-о порядку

$$\frac{dl(t)}{dt} = -\beta \frac{dG(l(t))}{dl}, \quad (\beta > 0). \quad (4.5)$$

Отже, підставивши рівняння (4.2) в рівняння (4.3) одержимо похідну функціоналу

$$\frac{dG(l(t))}{dl} = -\frac{\partial f(l, c^{(i)})}{\partial l} \left[\frac{d^p o}{dt^p} - \frac{d^{p_l} c}{dt^{p_l}} \right], \quad (4.6)$$

де $\frac{\partial f(l, c^{(i)})}{\partial l}$ - стала.

Враховуючи рівняння (4.5) та рівняння (4.6) отримуємо алгоритм керування рухом

$$\dot{l}(t) = k \left[\frac{d^p o}{dt^p} - \frac{d^{p_l} c}{dt^{p_l}} \right], \quad (4.7)$$

де $k = \beta \frac{\partial f(l, c^{(i)})}{\partial l} = \text{const} > 0$ – коефіцієнт підсилення контролера.

Визначимо умови, при яких процес мінімізації функціоналу буде збіжним

$$\begin{aligned} \frac{dG(l(t))}{dt} &< 0; \\ G(l(t)) &\rightarrow 0, \end{aligned} \quad (4.8)$$

також враховуємо правила знаків, при якому $t \rightarrow \infty$

$$\text{sign}(k) = \text{sign}\left(\frac{\partial f(l, c^{(i)})}{\partial l}\right). \quad (4.9)$$

Використовуючи рівняння (4.1) обраховуємо змінну $\frac{d^p o}{dt^p}$ в алгоритмі регулювання (4.7), завдяки замиканню зазначеною кількістю зворотних зв'язків $o^{(i)} = c^{(i)}$

$$\frac{d^p o}{dt^p} = \sum_{j=0}^r m_j \frac{d^j c^*}{dt^j} - \sum_{i=0}^{(p-1)} h_i \frac{d^i c}{dt^i}. \quad (4.10)$$

Зменшивши зворотні зв'язки на одиницю, отримуємо алгоритм керування:

$$u(t) = k \left[\frac{d^{(p-1)} o}{dt^{(p-1)}} - \frac{d^{(p-1)} c}{dt^{(p-1)}} \right]; \quad (4.11)$$

$$\frac{d^{(p-1)} o}{dt^{(p-1)}} = \sum_{j=0}^{(r-1)} m_j \frac{d^j c^*}{dt^j} - \sum_{i=0}^{(p-2)} h_i \frac{d^i c}{dt^i}.$$

Отже, було розглянуто метод розробки алгоритмів керування. Відповідний закон ґрунтується на зворотності прямого метода Ляпунова по дослідженню стійкості [32]. Ідея зворотності полягає у визначенні керуючої дії, за якої замкнена система має заздалегідь задану функцію Ляпунова. Приклади застосування наведеної концепції представлені у наступних роботах [35-38].

4.2 Синтез алгоритму керування напругою

Порядок рівняння необхідної якості регулювання напругою навантаження обраховують за формулою:

$$\frac{do(t)}{dt} + \alpha_0 o(t) = \alpha_0 u^*(t), \quad (4.12)$$

де α_0 – коефіцієнт диференційного рівняння для 1-о порядку.

Для оцінки ступеню наближення дійсного процесу до необхідного використовуємо наступне рівняння:

$$G(i^*(t)) = \frac{1}{2} \left[\frac{do(t)}{dt} - \frac{du(t, i^*)}{dt} \right]^2, \quad (4.13)$$

де i^* - завдання керуючої функції, що змінюється у законі керування.

Відповідно до градієнтного алгоритму 1-о порядку виконується мінімізація функціоналу

$$\frac{di^*(t)}{dt} = -\beta_o \frac{dG(i^*(t))}{di^*}, \quad (4.14)$$

де $\beta_o > 0$ – стала.

Враховуючи рівняння (4.13) похідна функціоналу становитиме:

$$\frac{dG(i^*(t))}{di^*} = -g_{ou} \left(\frac{do(t)}{dt} - \frac{du(t)}{dt} \right), \quad (4.15)$$

де g_{ou} – коефіцієнт диференційного рівняння.

Для визначення алгоритму керування напругою потрібно підставити рівняння (4.15) в (4.14), як результат маємо

$$\frac{di^*(t)}{dt} = k_u \left(\frac{do(t)}{dt} - \frac{du(t)}{dt} \right), \quad (4.16)$$

де $k_u = g_{ou}\beta_o = \text{const}$ – коефіцієнт підсилення регулятора, що керує напругою навантаження.

Похідна координати $\frac{do(t)}{dt}$ по часу є прискоренням, що визначається з рівняння (4.12) за рахунок зворотного зв'язку за напругою $o=c$

$$\frac{do(t)}{dt} = \alpha_o (u^*(t) - u(t)). \quad (4.17)$$

Проінтегрувавши диференціальне рівняння (4.16), а також врахувавши рівняння (4.17) алгоритм керування напругою навантаження буде рівним:

$$\begin{aligned} i^*(t) &= k_u(o(t) - u(t)); \\ o(t) &= \alpha_0 \int (u^*(t) - u(t)) dt. \end{aligned} \tag{4.18}$$

З метою порівняння динамічної поведінки системи виберемо коефіцієнти нового алгоритму керування напругою на навантаженні рівними коефіцієнтам *PI*-регулятора напруги під час розрядження акумуляторної батареї. Тобто $\alpha_0 = 31.25$, а $k_u = 0.25$.

Імітаційна модель регулятора на основі зворотних задач динаміки, яка розроблена в прикладному пакеті MATLAB Simulink, зображена на рисунку 4.1.

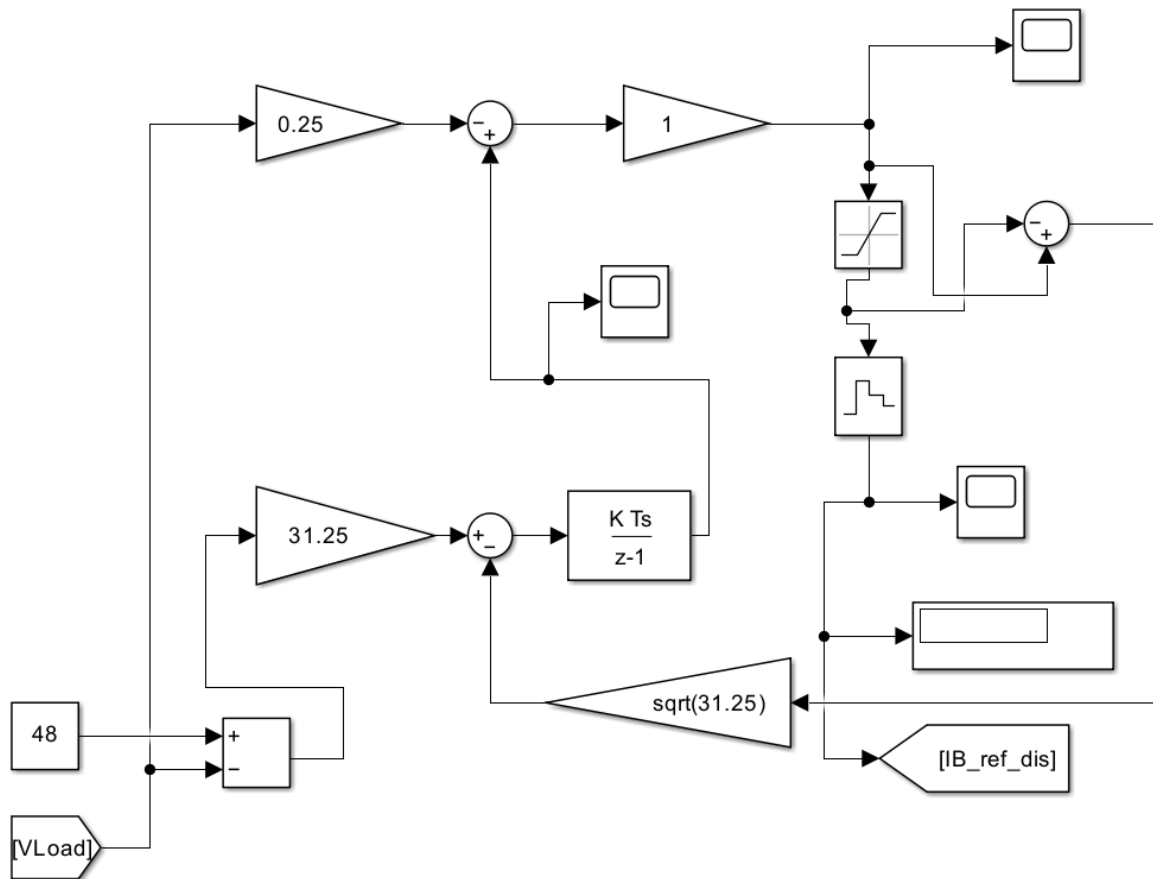


Рисунок 4.1 – Розроблена імітаційна модель регулятора *IPD*

4.3 Порівняльний аналіз систем накопичення електричної енергії з *PI* та *IPD* контролерами

При моделюванні перехідних процесів в СНЕ з Li-ion АБ були прийняті наступні параметри:

- номінальна напруга зовнішнього джерела $E_G=48$ В;
- номінальна напруга АБ $U_H=24$ В;
- напруга неробочого ходу при $SoC=80\%$ $U_{HX}=25.98$ В;
- ємність АБ $C=50$ А·год;
- внутрішній опір АБ $R_{BH}=0.0048$ Ом;
- номінальний струм розряду АБ $I_{роз}=22$ А;
- активний опір навантаження $R_H=15$ Ом;
- активний опір RC -фільтра $R_1=1$ мОм;
- ємність RC -фільтра $C=1000$ мкФ;

- індуктивність котушки $L=0.576$ мГн;
- активний опір котушки індуктивності $R_2=0.05$ Ом.

Виявимо особливості роботи СНЕ з *IPD*-регулятором у режимі розрядження, порівнюючи з традиційною системою, яка використовує *PI*-регулятор.

На рисунку 4.2 наведена структура *PI*-регулятора напруги.

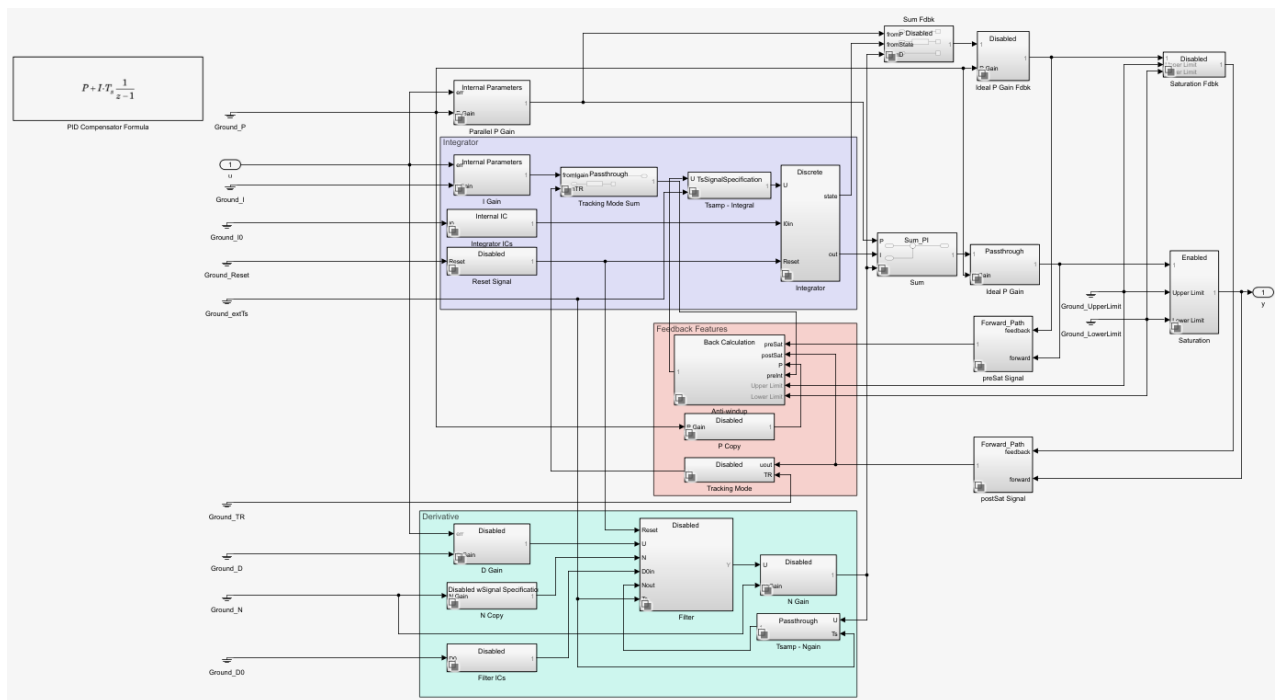


Рисунок 4.2 – Математична модель *PI*-регулятора з бібліотеки Simulink

Виконаємо дослідження поведінки СНЕ при SoC АБ, яка дорівнює: 100 %, 80 %, 50 % та 20 %, тому що величина SoC впливає на значення параметрів.

Порядок проведення дослідження для часу $t=5$ с:

1. У момент часу $t=0$ завдання у вигляді ступінчастої функції, значення якої дорівнює напрузі неробочого ходу (25.98 В) при SoC АБ 80%, подається на вхід регулятора напруги.
2. Коли $t=2.5$ с здійснюється перемикання режимів із зарядження до розрядження АБ ($U_H=48$ В).

На рисунку 4.3 зображено графіки перехідних процесів в СНЕ при SoC АБ 100 %.

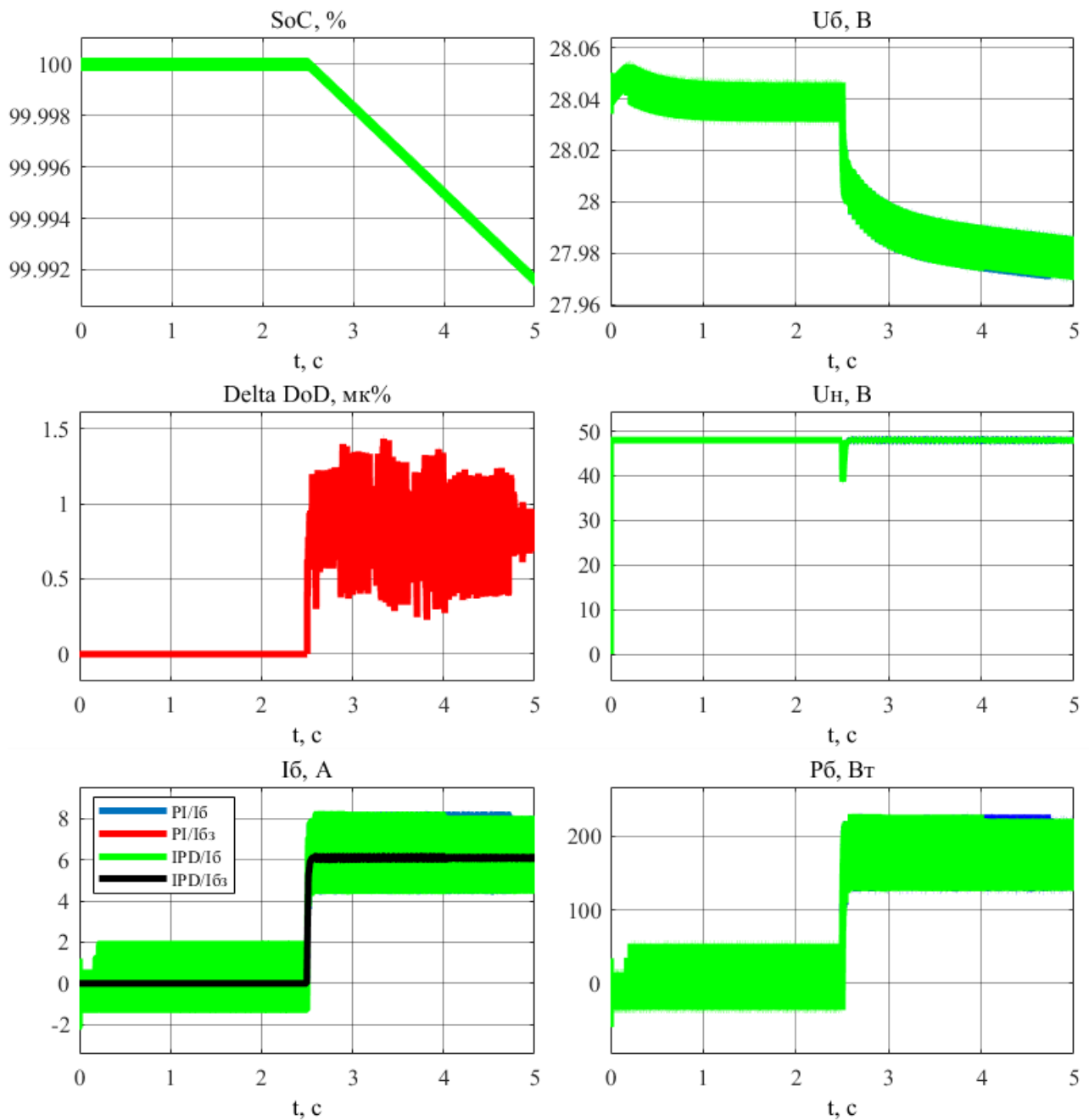


Рисунок 4.3 – Перехідні процеси при SoC АБ 100 % (синя – PI -регулятор, зелена – IPD -регулятор)

Графіки перехідних процесів (рис. 4.3) стану заряду акумулятора SoC, струму акумулятора I_6 , напруги акумуляторної батареї U_6 , напруги на навантаженні U_H , потужності АБ збігаються. SoC при 5 с дорівнює 99.991 %. Так

як акумуляторна батарея знаходиться у зарядженому стані, то струм зарядження АБ дорівнює 0.

Струм розрядження становить 6 А. Коефіцієнт пульсацій струму АБ K_{PrI} для *PI*-регулятора рівний 0.241, для *IPD*-регулятора – 0.279.

Напруга на АБ для режиму розрядження дорівнює 27.98 В. Напруга на навантаженні в режимі розрядження АБ дорівнює 48 В. Максимальне відхилення напруги навантаження від усталеного значення під час перехідного процесу для *PI*-регулятора – 9.1 В, а для *IPD*-регулятора – 9.34 В. Відхилення від усталеного значення U_n під час перехідного процесу при застосування двох типів регуляторів дорівнює 0. Коефіцієнт пульсацій по напрузі навантаження $K_{\text{Pr}U_n}$ для: *PI*-регулятора становить $1.49 \cdot 10^{-3}$, *IPD*-регулятора – $1.249 \cdot 10^{-3}$. Активна потужність для циклу 5 с дорівнює 170 Вт та є однаковою для 2-х регуляторів.

Перевага *IPD*-регулятора полягає у тому, що глибина розряду акумулятора є меншою, це видно по абсолютній похибці $\Delta \text{DoD} = \text{DoD}_{\text{PI}} - \text{DoD}_{\text{IPD}}$, яка рівна 0.85 мк% (рис. 4.3).

На рисунку 4.4 зображено графіки перехідних процесів в СНЕ при SoC АБ 80 %.

SoC при 5 с дорівнює 79.99 %. Причина відсутності струму зарядження АБ подібна випадку коли SoC=100 %.

Струм розрядження становить 6.6 А, що є більшим ніж при SoC=100 %. Коефіцієнт пульсацій струму АБ K_{PrI} для *PI*-регулятора рівний 0.288, для *IPD*-регулятора – 0.286.

Напруга на АБ для режиму розрядження дорівнює 25.92 В. Максимальне відхилення напруги навантаження від усталеного значення під час перехідного процесу для *PI*-регулятора – 9.35 В, а для *IPD*-регулятора – 9.75 В. Відхилення від усталеного значення U_n під час перехідного процесу дорівнює 0. Коефіцієнт пульсацій по напрузі навантаження $K_{\text{Pr}U_n}$ для: *PI*-регулятора становить $3.13 \cdot 10^{-3}$, *IPD*-регулятора – $2.71 \cdot 10^{-3}$. Значення активної потужності не змінилось.

Абсолютна похибка за DoD становить 0.9 мк% (рис. 4.4).

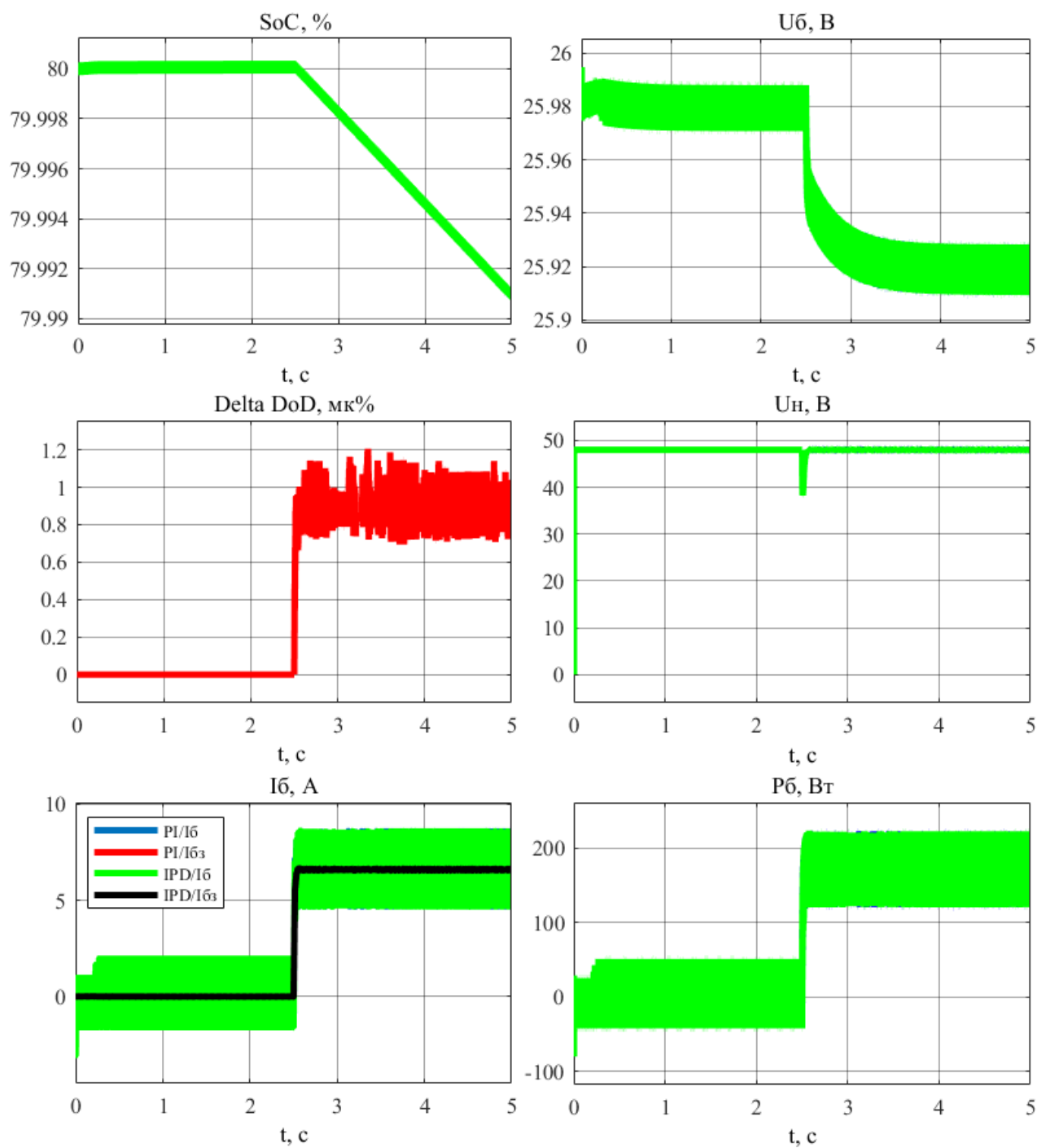


Рисунок 4.4 - Перехідні процеси при SoC АБ 80 % (синя – PI -регулятор, зелена – IPD -регулятор)

На рисунку 4.5 наведені графіки перехідних процесів в СНЕ при SoC АБ 50 %.

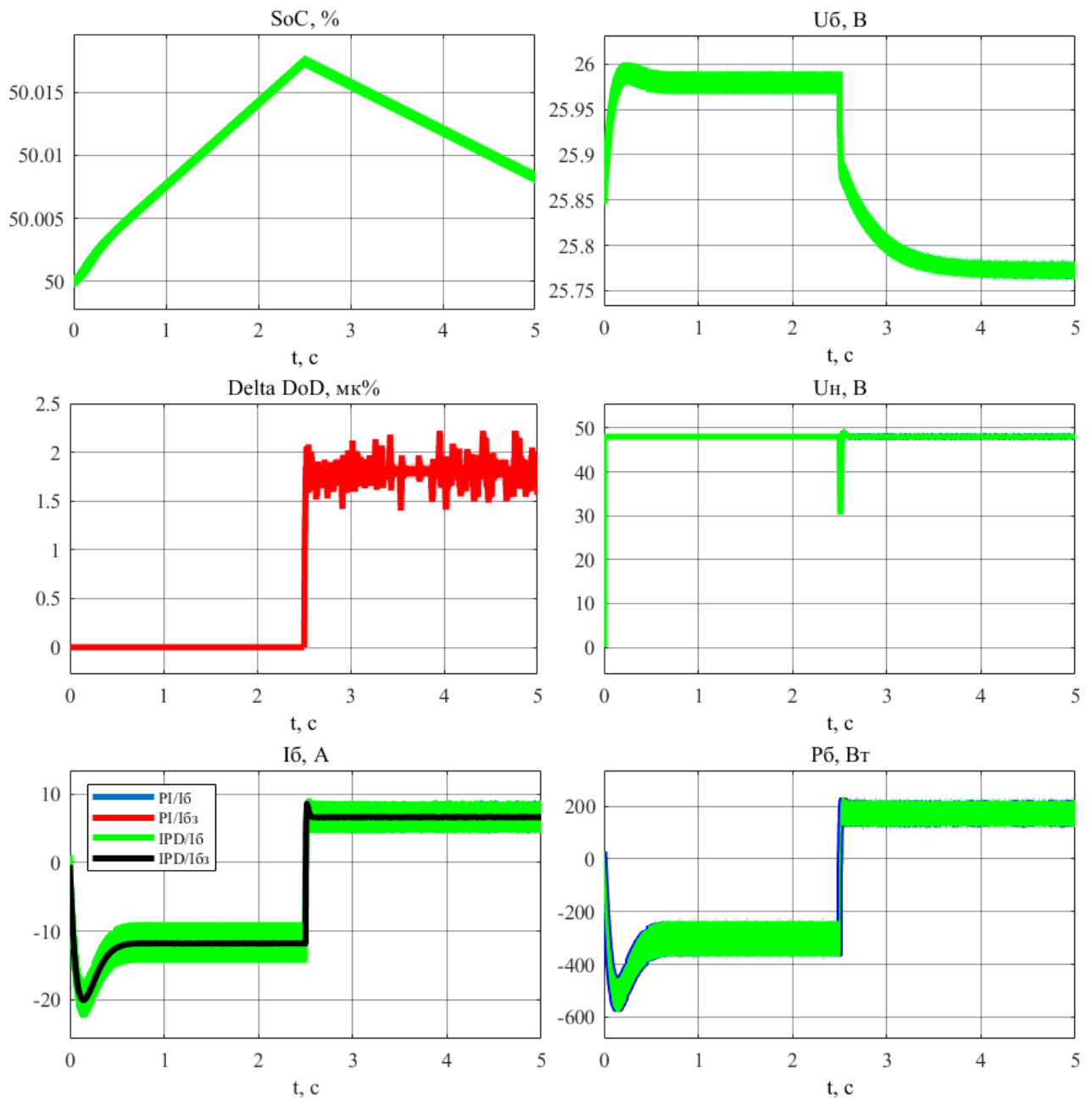


Рисунок 4.5 - Перехідні процеси при SoC АБ 50 % (синя – PI -регулятор, зелена – IPD -регулятор)

Так як стан заряду батареї рівний 50 %, то система керування вмикає режим зарядження АБ. Заряд акумулятора у проміжку часу від 0 с до 2.5 с зростає від 50 % до 50.017 %. За період 5 с SoC становить 50.008 %.

Струм заряджання становить 11.8 А. Максимальне відхилення струму заряджання $\Delta I_{\text{зад}}$ від усталеного значення під час перехідного процесу дорівнює 8.29 А. Усталене значення струму розряджання АБ для PI -регулятора становить

6.65 А, для *IPD*-регулятора – 6.64 А. Максимальне відхилення заданого струму розрядження для: *PI*-регулятора рівне 2 А, *IPD*-регулятора – 1.93 А. Коефіцієнт пульсацій струму АБ $K_{\text{прI}}$ для *PI*-регулятора рівний 0.283, для *IPD*-регулятора – 0.272.

Максимальна прикладена напруга заряджання – 25.98 В. У момент часу $t=5$ с напруга на затискачах батареї у режимі розрядження для двох регуляторів буде рівною 25.78 В.

Максимальне відхилення напруги навантаження від усталеного значення під час перехідного процесу для *PI*-регулятора – 17 В, для *IPD*-регулятора – 17.7 В. Відхилення від усталеного значення U_n під час перехідного процесу для: *PI*-регулятора – 1.2 В, *IPD*-регулятора – 1.1 В.

Коефіцієнт пульсацій по напрузі навантаження $K_{\text{пр}U_n}$ для: *PI*-регулятора становить $3.23 \cdot 10^{-3}$, *IPD*-регулятора – $3.348 \cdot 10^{-3}$. Значення активної потужності залишилось незмінним. Абсолютна похибка за DoD рівна 1.8 мк% (рис. 4.5).

Рисунок 4.6 відображає графіки перехідних процесів в СНЕ при SoC АБ 20 %.

Коли стан заряду АБ дорівнює 20 %, то система керування також вмикає режим зарядження АБ. Заряд акумулятора у проміжку часу від 0 с до 2.5 с зростає від 20 % до 20.035 %. За період 5 с стан заряду АБ становить 20.025 %.

Струм заряджання становить 25 А. Усталене значення струму розряджання АБ для: *PI*-регулятора становить 6.8 А, *IPD*-регулятора – 6.74 А. Максимальне відхилення заданого струму розрядження для: *PI*-регулятора становить 1.85 А, *IPD*-регулятора – 1.86 А. Коефіцієнт пульсацій струму АБ $K_{\text{прI}}$ для: *PI*-регулятора рівний 0.295, *IPD*-регулятора – 0.294.

Найбільше значення прикладеної напруги заряджання дорівнює 25.61 В. У момент часу $t=5$ с напруга на затискачах батареї під час розрядження рівна 25.25 В.

Максимальне відхилення на напрузі навантаження від усталеного значення під час перехідного процесу для: *PI*-регулятора – 16 В, *IPD*-регулятора – 16.8 В.

Відхилення від усталеного значення U_n під час перехідного процесу для: PI -регулятора – 1.7 В, IPD -регулятора – 1.7 В.

Коефіцієнт пульсацій напруги навантаження $K_{\text{Пр}U_n}$ для: PI -регулятора рівний $4.994 \cdot 10^{-3}$, IPD -регулятора – $4.994 \cdot 10^{-3}$. Активна потужність для обох регуляторів незмінна. Абсолютна похибка за глибиною розряду АБ дорівнює 2.5 мк% (рис. 4.6).

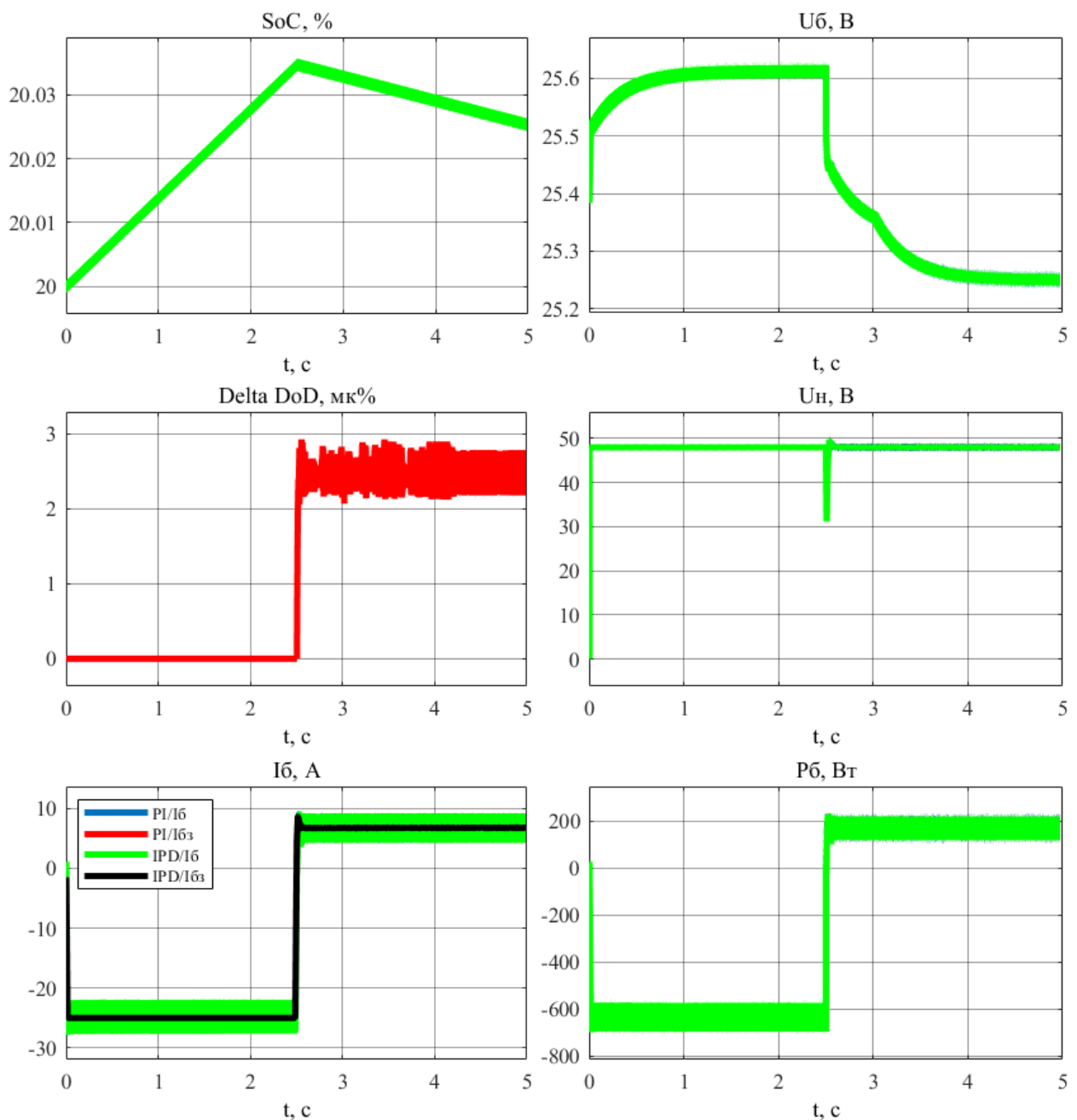


Рисунок 4.6 – Перехідні процеси при SoC АБ 20 % (синя – PI -регулятор, зелена – IPD -регулятор)

Висновки до четвертого розділу

Розроблено покращену СНЕ з використанням *IPD*-регулятора напруги, який забезпечує кращий DoD, при різних станах заряду акумулятора, таких як 100 %, 80%, 50% та 20%.

Вперше синтезовано *IPD*-регулятор для керування напругою навантаження та розрядження АБ на основі концепції зворотних задач динаміки в сполученні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих енергій руху, який забезпечує грубість до параметричних збурень. За допомогою програми MATLAB розроблено імітаційну модель нового *IPD*-регулятора.

Проведено порівняльний аналіз СНЕ з *PI* та *IPD*-контролерами за рахунок математичного моделювання процесів, який дозволив визначити:

- найбільше значення струму заряджання для SoC 20 % - 25 А;
- струм розряджання при зменшені стану заряду АБ зростає,
- струм розряджання при *IPD*-регуляторі менший ніж при *PI*-регуляторі;
- коефіцієнт пульсацій струму розряду менший при SoC=100 % в системі з *PI*-регулятором, для інших значень SoC коефіцієнт пульсацій менший у системі з *IPD*-регулятором;
- при зменшені SoC напруга розряджання АБ знижується;
- максимальне відхилення напруги навантаження від усталеного значення під час перехідного процесу більше в системі з *IPD*-регулятором;
- відхилення напруги навантаження від усталеного значення при 100 % та 80 % стану заряду АБ відсутні, а при: 50 % – 1.2 В (*PI*) та 1.1 В (*IPD*); 20 % SoC рівні між собою (1.7 В);
- коефіцієнт пульсацій по напрузі навантаження $K_{\text{ПpУн}}$ зростає при зменшені значення SoC;
- коефіцієнт пульсацій напруги навантаження менший у системі (*IPD*) для SoC – 100 %, 80%, 50%, та більший для SoC=20 %;
- зі зменшенням стану заряду АБ абсолютна похибка DoD зростає;
- активна потужність є незмінною при варіації SoC.

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації вирішено актуальну проблему зменшення глибини розрядження акумуляторної батареї DoD в умовах параметричних збурень, що пов'язані з варіацією SoC за рахунок застосування системи підпорядкованого регулювання електричними координатами та покращеним контролером розрядження акумулятора на основі зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів енергії руху. Запропонована замкнена система наперед має задану функцію Ляпунова та має властивість асимптотичної стійкості.

Протягом дослідження одержано основні результати роботи:

1. Електрохімічні СНЕ є найрозповсюдженішими та мають наступні переваги: широкий діапазон потужності, велика густина енергії, швидкий час реакції та відсутність шкідливих викидів під час їхньої роботи.

2. Li-ion акумулятор є ефективним рішенням для СНЕ та має переваги: велика густина енергії, високий ККД, тривалий термін роботи, висока навантажувальна здатність, відсутність додаткового обслуговування та невелика вага по відношенню до ємності.

3. Математична модель Тевеніна 2-о порядку більш точно описує роботу акумуляторної батареї під час процесів заряджання та розряджання у порівнянні з моделлю *Rint*, *RC* та Тевеніна 1-о порядку.

4. Здійснено типове налаштування системи підпорядкованого регулювання електричними координатами СНЕ на симетричний та модульний оптимуми. Використано три найбільш поширені типи батарей: свинцево-кислотний, нікель-кадмієвий та літій-іонний. Найбільше значення SoC спостерігається у Li-ion акумулятора, що дорівнює 50.001 %. DoD свинцево-кислотного акумулятора має найбільше значення 50.011 %, а найменше значення (49.998 %) є у Li-ion акумуляторі. Найбільший струм розряджання має свинцево-кислотний акумулятор – 7.4 А, а найменший струм розряду має Li-ion батарея – 6.65 А. Перевагою літій-іонного акумулятора є найменше значення

максимального відхилення напруги навантаження від усталеного значення, який дорівнює 17.03 В. Також перевагою Li-ion акумулятора є найменше значення $K_{\text{пр}U} = 3.23 \cdot 10^{-3}$.

5. Розроблено новий *IPD*-регулятор напруги розрядження для СНЕ з DC-DC перетворювачем на основі зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів енергії руху, як наслідок зменшено глибину розряду акумуляторної батареї DoD.

6. Проведено порівняльний аналіз СНЕ з *PI* та *IPD*-контролерами за рахунок математичного моделювання процесів. Відповідний аналіз дозволив визначити: струм розрядження при зменшені стану заряду АБ зростає; струм розрядження при використанні *IPD*-регулятора менший ніж при застосуванні *PI*-регулятора; коефіцієнт пульсацій струму розряду менший при SoC=100 % в системі з *PI*-регулятором, для інших значень SoC коефіцієнт пульсацій менший у системі з *IPD*-регулятором; максимальне відхилення напруги навантаження від усталеного значення під час перехідного процесу більше в системі з *IPD*-регулятором; при зменшені SoC напруга розрядження АБ знижується.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ніконенко Є. О. Керування електромеханічними системами електричних транспортних засобів з гібридним акумуляторно-суперконденсаторним джерелом живлення: дис. ... канд. техн. наук: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, 14 – Електрична інженерія / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ. 2023. 189 с.
2. Berrada A., Loudiyi K., Zorkania I. System design and economic performance of gravity energy storage. *Cleaner Production*. 2017. No 256. Pp. 317–326.
3. Botha C., Kamper M. Capability study of dry gravity energy storage. *Energy Storage*. 2019. No 23. Pp. 159–174.
4. Gonçalves de Oliveira, J. Power Control Systems in a Flywheel based All-Electric Driveline: Ph.D. Thesis. / Uppsala Universitet. Sweden. Uppsala. 2011. 102 p.
5. Лісовий О.Р., Бурик М.П., Лободзинський В.Ю. Системи накопичення енергії. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. 2023. С. 360-365. URL: <http://jour.fea.kpi.ua/article/view/302558>
6. Rehman S., Al-Hadhrami L., Alam M. Pumped hydro energy storage system: a technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. No 44. Pp. 586–598.
7. Vazquez S., Lukic S., Galvan E. Energy storage systems for transport and grid applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010. No 57. Pp. 3881–3895.
8. Yatish T. Shah. Thermal Energy Sources, Recovery, and Applications. Boca Raton, 2018. 888 p.
9. Mitali J., Dhinakaran S., Mohamad A. Energy storage systems: a review. *Energy Storage and Saving*. 2022. No 1. Pp. 166-216.
10. Lee K. Cavern thermal energy storage systems, underground thermal energy storage, Green Energy and Technology. 2013. 151 p.

11. Banks H., Frengstad B. Design considerations for borehole thermal energy storage (BTES): a review with emphasis on convective heat transfer. *Geofluids*. 2019. 306 p.
12. Datta U., Kalam A., Shi J. A review of key functionalities of battery energy storage system in renewable energy integrated power systems. *Energy Storage*. 2021. No 3. DOI: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/est2.224>
13. Ding Y., Riffat S. Thermochemical energy storage technologies for building applications: a state-of-the-art review. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2013. No 8. Pp. 106–116.
14. Chen H., Cong T., Yang W. Progress in electrical energy storage system: a critical review. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2009. No 19. Pp. 219–312.
15. Styring S. Solar fuels: vision and concepts. *Ambio*. 2012. No 41. Pp. 156–162.
16. May G., Davidson A., Monahov B. Lead batteries for utility energy storage: a review. *Journal of Energy Storage*. 2018. No 15. Pp. 145–157.
17. Shen X., Zhang X., Ding F. Advanced electrode materials in lithium batteries: retrospect and prospect. *Energy Material Advances*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.34133/2021/1205324>
18. Karlina F., Waruwu M., Wijaya R. Study of Several Types of Lithium-polymer Batteries With3sBattery Management System. 6th International Energy Conference *Astechnova 2021*. 24-25 August 2021.
19. Tseng Y.M., Huang H.S., Chen L.S., Tsai J.T. Characteristic research on lithium iron phosphate battery of power type. The 3rd International Conference on *Precision Machinery and Manufacturing Technology*. 31 July 2018. Vol. 185.
20. Alghamdi S., Rana M., Peng X. Zinc–Bromine Rechargeable Batteries: From Device Configuration, Electrochemistry, Material to Performance Evaluation. *Nano-Micro Letters*. 2023. No 209.

21. Zhang H., Menictas C., Skyllas-Kazacos M. Polysulfide-bromine flow batteries (PSBs) for medium-and large-scale energy storage. *Woodhead Publishing*. 2015. Pp. 317-327. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-013-2.00009-1>
22. Bocklisch T. Hybrid energy storage systems for renewable energy applications. *Energy Procedia*. 2015. No 73. Pp. 103-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.582>
23. Plakhtii O., Philipjeva M., Mashura A. Research of mathematical models of lithium-ion storages. *International Scientific Journal "Mathematical Modeling"*. 2019. No 3. Pp. 127-130.
24. Xiong H., Fan R. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *Energies*. 2011. No 4. Pp. 582-598. DOI: <https://doi.org/10.3390/en4040582>
25. Bergveld H. Battery management systems: design by modelling. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2001. 329 p.
26. Lawder M. T., Suthar B., Paul W. C. Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications. *Invited Paper*. 2014. No 102. Pp. 1014-1030.
27. Pires V. F., Romero-Cadaval E., Vinnikov D., Roasto I., Martins J.F. Power converter interfaces for electrochemical energy storage systems – A review. *Energy Conversion and Management*. 2014. No 86. Pp. 453-475.
28. Бурик І., Павленко С., Биркун А., Олгодворець Л., Бурик М., Лісовий О. Приладове моделювання польових транзисторів із каналом у вигляді двовимірних матеріалів. Тези доповідей за матеріалами Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики Еврика-2024. Львів. 2024. С. 121-122.
29. Amin M., Mohammed O. A three-phase high frequency semi-controlled battery charging power converter for plug-in hybrid electric vehicles. 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, AZ, USA, 17-22 September, 2011. Pp. 2641-2648. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ECCE.2011.6064122>

30. Leonhard W. Control of electrical drives: 3d edition. Springer-Verlag, 2001. 460 p.
31. Buryk M., Ostroverkhov V., Buryk I. Robust Vector Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with a Strategy of Maximum Torque per Ampere. 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). Kyiv, 12-14 October, 2022. Pp. 302-307. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969344>
32. Бурик М. П. Електромеханічні системи підпорядкованої структури з властивостями слабкої чутливості до параметричних та координатних збурень: монографія / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ. 2021. 268 с.
33. Buryk M., Ostroverkhov M., Boiko V. Algorithms of Robustly Stable Systems for Synchronous Electric Drive in Field Weakening Mode, 2021 IEEE 2nd KhPIWeek on Advanced Technology (KhPIWeek), 13-17 September, 2021. Pp. 433-438. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570074>
34. Ostroverkhov M., Buryk M. Vector Control of Field Regulated Reluctance Motor. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). Lviv, Ukraine, 02-06 July, 2019. Pp. 486-490. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879902>
35. Ostroverkhov M., Buryk M. Speed Control System of Synchronous Motor Drives with Field Weakening using the Concept of Inverse Problems of Dynamics. 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 12-14 May, 2020. Pp. 310-314. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160008>
36. Ostroverkhov M., Buryk M. Control of Permanent Magnet Synchronous Motor under Conditions of Parametric Uncertainty, 2019 IEEE International Conference of Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 23-25 September, 2019. Pp. 98-101. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MEES.2019.8896635>
37. Ostroverkhov N., Buryk N. Control System with Field Weakening of Synchronous Motor Drive. 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory

and Practice (PAEP). Kremenchuk, Ukraine, 21-25 September, 2020. Pp. 1-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240903>

38. Buryk M., Ostroverkhov M., Spinul L. Synchronous Drive with Dual-Zone Speed Control. 2021 IEEE International Conference of Modern Electrical and Energy Systems (MEES). Kremenchuk, Ukraine, 21-24 September, 2021. Pp. 1-6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598653>