

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ АВТОМАТИКИ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**

Кафедра: «Електрообладнання і автоматики суден»

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ У ГІБРИДНІЙ СУДНОВІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ
СТАНЦІЇ СУДНА ТИПУ RO-RO**

Виконав: здобувач другого (магістерського) рівня
вищої освіти, групи 3601

Спеціальність:

271 – Морський та внутрішній водний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

Спеціалізація: «Експлуатація суднового
електрообладнання і засобів автоматики»

КРИЦЬКИЙ ВІТАЛІЙ ІГОРОВИЧ

(підпис, прізвище та ініціали)

допущений до захисту 10.12.2025
(дата)

Завідувач кафедри  Ірина ГВОЗДЕВА
(підпис, прізвище та ініціали)

Керівник  Ірина ГВОЗДЕВА
(підпис, прізвище та ініціали)

Нормоконтролер  В. В. Михайленко
(підпис, прізвище та ініціали)

Рецензент  Віктор Бузин
(підпис, прізвище та ініціали)

Одеса – 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

«ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки

Спеціалізація: Експлуатація суднового електрообладнання і засобів
автоматики

Кафедра «Електрообладнання і автоматики суден»

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

Ірина ГВОЗДЕВА

«10» 12 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу магістра

КРИЦЬКОГО ВІТАЛІЯ ІГОРОВИЧА

(прізвище та ініціали)

1. Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ У ГІБРИДНІЙ СУДНОВІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ СТАНЦІЇ СУДНА ТИПУ RO-RO
затверджена наказом ректора № 1503 від “ 10 ” грудня 2025 року
2. Термін закінчення роботи: “ 8 ” грудня 2025 року
3. Вихідні дані до роботи: параметри та структура суднової електричної станції, характеристики фотоелектричних перетворювачів, акумуляторних батарей та інверторів.
4. Зміст дипломної роботи магістра: 1. Аналіз поточного стану та майбутніх напрямків розвитку гібридних суднових електростанцій. 2. Процеси у фотоелектричних системах у складі гібридних електростанцій. 3. Комп'ютерне моделювання процесів у гібридній судновій електростанції. 4. Склад та

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ

створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 00:18:12 11.12.2025

Назва файлу з підписом: ДРМ_Крицький_101225.pdf.p7s

Розмір файлу з підписом: 2.9 МБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: ДРМ_Крицький_101225.pdf

Розмір файлу без підпису: 2.9 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: КРИЦЬКИЙ ВІТАЛІЙ ІГОРОВИЧ

П.І.Б.: КРИЦЬКИЙ ВІТАЛІЙ ІГОРОВИЧ

Країна: Україна

РНОКПП: 3780705919

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 00:18:11 11.12.2025

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000F6BCFF015C82FB06

Тип носія особистого ключа: ЗНКІ криптомодуль ІІТ Гряда-301

Серійний номер носія особистого ключа: 011

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Кваліфікований

Тип контейнера: Підпис та дані в одному файлі (CAAdES enveloped)

Формат підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CAAdES-X Long)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.08.25 13:00

структура експериментальної суднової гібридної електричної станції.

5. Перелік ілюстрацій до презентації дипломної роботи магістра: структурні схеми гібридних електростанцій різної конфігурації; структурні схеми мережевих фотоелектричних систем, алгоритм роботи схеми управління ФЕС схема установки, яка пропонується для застосування у складі ГЕС.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи магістра	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання до ДРМ	30.10.2024	Виконано
2	Вивчення поточного стану та напрямків розвитку гібридних суднових електростанцій	31.10.2024-26.12.2024	Виконано
3	Дослідження процесів у фотоелектричних системах	06.01.2025-11.02.2025	Виконано
4	Комп'ютерне моделювання процесів у гібридній суднової електростанції	12.02.2025-01.05.2025	Виконано
5	Розробка алгоритму роботи схеми управління ФЕС	02.05.2025-24.06.2025	Виконано
6	Визначення складу та структури експериментальної суднової гібридної електричної станції	03.09.2025-03.11.2025	Виконано
7	Створення пояснювальної записки	04.11.2025-8.12.2025	Виконано

Курсант (студент) _____
(підпис)

Віталій КРИЦЬКИЙ
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ірина ГВОЗДЕВА
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 99 с., 35 рис., 4 табл., 33 джерела.

Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ У ГІБРИДНІЙ СУДНОВІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ СТАНЦІЇ СУДНА ТИПУ Ro-Ro

Актуальність теми. Сучасні електроенергетичні системи (СЕЕС) на судах є вже не простим генератором електричної енергії, а електростанцією з комплексом допоміжних пристроїв, складною автоматикою управління і контролю. Від надійної роботи СЕЕС залежить життєздатність судна та працездатність суднових механізмів і систем. СЕЕС призначена для забезпечення електричною енергією споживачів у необхідній кількості у всіх режимах роботи судна. Якість генеруючої електричної енергії має відповідати вимогам Регістру. Питання енергозбереження та підвищення енергоефективності, вимоги міжнародних конвенцій по забрудненню довкілля та охорони людського життя на морі сприяють впровадженню різних програм, які спрямовані на гібридизацію реєстрових суден з використанням, так званих, відновлюваних джерел енергії. Однією з альтернатив рішення вказаних завдань є застосування фотоелектричних систем (ФЕС) у складі суднових гібридних електричних станцій (ГЕС).

При впровадженні ФЕС на морських реєстрових судах виникають додаткові завдання, які пов'язані з необхідністю оцінки ефективності її роботи, можливістю передбачення її потужності, порівняння ефективності використання різних типів фотоелектричних перетворювачів (ФЕП). У суднових експлуатаційних умовах потрібно враховувати фактори впливу навколишнього середовища, такі як: зміна інтенсивності сонячного випромінювання, качку судна, постійну вібрацію від працюючих механізмів тощо. У зв'язку з викладеним, пропонується магістерська робота, яка присвячена дослідженню ФЕС у якості допоміжного джерела електроенергії у складі ГЕС, є актуальною та своєчасною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами: тематика магістерської роботи співпадає з науковими дослідженнями кафедри електрообладнання і автоматики суден Національного університету «Одеська морська академія».

Метою роботи є дослідження можливості підвищення надійності і ефективності функціонування гібридних суднових електроенергетичних систем суден типу Ro-Ro за рахунок впровадження до їх складу фотоелектричних електростанцій в якості резервного джерела електричної енергії.

Завдання дослідження:

- 1) Провести аналіз поточного стану та майбутніх напрямків розвитку гібридних суднових електростанцій.
- 2) Виконати порівняльний аналіз процесів у фотоелектричних системах у складі гібридних електростанцій при різних варіантах їх побудови.
- 3) Провести комп'ютерне моделювання процесів у гібридній судновій електростанції, розробити алгоритм її роботи.
- 4) Запропонувати склад та структуру експериментальної суднової гібридної електроенергетичної станції з метою аналізу взаємодії систем фотоелектричних перетворювачів з елементами суднової гібридної електроенергетичної системи.
- 5) Проаналізувати отримані результати і обґрунтувати конфігурацію фотоелектричної станції для застосування у якості резервного джерела електропостачання на судах типу Ro-Ro.

Об'єкт дослідження: процеси перетворення енергії у гібридній судновій електричній станції судна типу Ro-Ro, у складі якої застосовується фотоелектрична електростанція в якості резервного джерела електричної енергії.

Предмет дослідження. Структурні, математичні та комп'ютерні моделі процесів перетворення енергії у гібридній судновій електричній станції судна типу Ro-Ro, у складі якої застосовується фотоелектрична електростанція в якості резервного джерела електричної енергії.

Гіпотеза. Підвищення надійності і ефективності функціонування гібридних суднових електричних станцій суден типу Ro-Ro можливо за рахунок впровадження до їх складу фотоелектричних станцій у якості резервних джерел електричної енергії.

Методи дослідження. При дослідженні процесів, що відбуваються у фотоелектричних перетворювачах використані методи теоретичної фізики, методи

математичного і комп'ютерного моделювання застосовані при дослідженні процесів у системі фотоелектричних перетворювачів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в:

1) Набуло подальшого розвитку використання систем фотоелектричних перетворювачів у складі ФЕС як резервного джерела електроенергії на суднах типу Ro-Ro на основі дослідження процесів перетворення енергії у судновій гібридній електростанції.

2) Удосконалено алгоритм роботи пристрою управління процесами в резервній системі електропостачання з використанням фотоелектричної станції у складі гібридної електростанції судна типу Ro-Ro.

3) Удосконалено методику проведення комп'ютерного моделювання процесів в системах фотоелектричних перетворювачів в різних експлуатаційних режимах під впливом чинників навколишнього середовища, відмінних від стандартних.

4) Запропонована структура та склад експериментальної суднової гібридної електроенергетичної станції та проаналізовані процеси перетворення енергії у неї.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості підвищення надійності і ефективності функціонування гібридних суднових електричних станцій суден типу Ro-Ro за рахунок впровадження до їх складу фотоелектричних станцій у якості резервних джерел електричної енергії.

Апробація результатів дипломної роботи. доповідь з тематики даної роботи обговорювалась на XV міжнародній науково-технічній конференції “Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика” (СЕЕЕА), яка проходила 26 листопада 2025 р. у Національному університеті “Одеська морська академія”, місто Одеса.

Публікації. Публікація [1] із зв'язаною тематикою дипломної магістерської роботи опублікована у матеріалах XV міжнародній науково-технічній конференції “Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика” (СЕЕЕА).

ГІБРИДНА СУДНОВА ЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ, ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНА
УСТАНОВКА, ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ
ПЕРЕТВОРЮВАЧ, АКУМУЛЯТОР

ABSTRACT

Master's thesis: 99 pp., 35 figures, 4 tables, 33 sources.

Topic: RESEARCH OF PROCESSES IN A HYBRID MARINE POWER PLANT OF A Ro-Ro TYPE SHIP

Relevance of the topic. Modern electrical power systems (EPS) on ships are no longer a simple generator of electrical energy, but a power plant with a complex of auxiliary devices, complex automation of control and monitoring. The viability of the ship and the operability of ship mechanisms and systems depend on the reliable operation of the EPS. The EPS is designed to provide consumers with electrical energy in the required quantity in all modes of operation of the ship. The quality of the generated electrical energy must meet the requirements of the Register. The issues of energy saving and increasing energy efficiency, the requirements of international conventions on environmental pollution and the protection of human life at sea contribute to the implementation of various programs aimed at the hybridization of registered ships using so-called renewable energy sources. One of the alternatives to solving these problems is the use of photovoltaic systems (PVS) as part of ship hybrid power plants (HPPs).

When implementing photovoltaic power plants on marine vessels, additional tasks arise, which are associated with the need to assess the efficiency of its operation, the ability to predict its power, and compare the efficiency of using different types of photovoltaic converters (PVCs). In ship operating conditions, it is necessary to take into account environmental factors, such as: changes in the intensity of solar radiation, vessel pitching, constant vibration from operating mechanisms, etc. In connection with the above, the proposed master's thesis, which is devoted to the study of photovoltaic power plants as an auxiliary source of electricity in the composition of hybrid power plants, is relevant and timely.

The connection of the work with scientific programs, topics, plans: the topic of the master's thesis coincides with the scientific research of the Department of Electrical Equipment and Automation of Ships of the National University "Odesa Maritime Academy".

The purpose of the work is to study the possibility of increasing the reliability and efficiency of the operation of hybrid ship power plants of Ro-Ro vessels by introducing photovoltaic power plants as a backup source of electrical energy into their composition.

Research tasks:

1) To analyze the current state and future directions of development of hybrid ship power plants.

2) To perform a comparative analysis of processes in photovoltaic systems as part of hybrid power plants in different variants of their construction.

3) To conduct computer modeling of processes in a hybrid ship power plant, to develop an algorithm for its operation.

4) To propose the composition and structure of an experimental ship hybrid power plant in order to analyze the interaction of photovoltaic converter systems with elements of the ship hybrid power system.

5) To analyze the results obtained and justify the configuration of the photovoltaic plant for use as a backup source of electrical energy on Ro-Ro vessels.

Object of research. Energy conversion processes in a hybrid ship electrical plant of a Ro-Ro vessel, which uses a photovoltaic power plant as a backup source of electrical energy.

Subject of research. Structural, mathematical and computer models of energy conversion processes in a hybrid ship electrical plant of a Ro-Ro vessel, which uses a photovoltaic power plant as a backup source of electrical energy.

Hypothesis. Increasing the reliability and efficiency of the operation of hybrid ship electrical plants of Ro-Ro vessels is possible by introducing photovoltaic plants into their composition as backup sources of electrical energy.

Research methods. In the study of processes occurring in photovoltaic converters, methods of theoretical physics were used, and methods of mathematical and computer modeling were applied in the study of processes in the system of photovoltaic converters.

The scientific novelty of the results obtained is:

1) The use of photovoltaic converter systems as part of a photovoltaic power plant as a backup source of electricity on Ro-Ro vessels has been further developed based on the study of energy conversion processes in a ship's hybrid power plant.

2) The algorithm for the operation of the process control device in a backup power supply system using a photovoltaic plant as part of a hybrid power plant on a Ro-Ro vessel has been improved.

3) The methodology for conducting computer modeling of processes in photovoltaic converter systems in various operating modes under the influence of environmental factors other than standard ones has been improved.

4) The structure and composition of an experimental ship's hybrid power plant have been proposed and the energy conversion processes in it have been analyzed.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of increasing the reliability and efficiency of the operation of hybrid ship electrical plants of Ro-Ro vessels by introducing photovoltaic plants as backup sources of electrical energy into their composition.

Approbation of the thesis results. A report on the topic of this work was discussed at the 15th International Scientific and Technical Conference “Ship Electrical Engineering, Electronics and Automation” (SEEEA), which was held on November 26, 2025 at the National University “Odessa Maritime Academy”, Odessa.

Publications. Publication [1] with the related topic of the master's thesis was published in the materials of the 15th International Scientific and Technical Conference “Ship Electrical Engineering, Electronics and Automation” (SEEEA).

HYBRID MARINE POWER PLANT, DIESEL GENERATING SET,
PHOTOELECTRIC PLANT, PHOTOELECTRIC CONVERTER, BATTERY

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	12
ВСТУП.....	13
1 АНАЛІЗ ПОТОЧНОГО СТАНУ ТА МАЙБУТНІХ НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ ГІБРИДНИХ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	14
1.1 Аналіз існуючих рішень гібридних суднових електростанцій	14
1.2 Принципи побудови гібридних електростанцій з дублюючими дизель-генераторними установками	16
1.3 Вибір складу і структури гібридного електроенергетичного комплексу та оцінка потенціалу сонячного випромінювання	21
1.4 Сучасні тенденції і перспективи у розвитку гібридних суднових електроенергетичних систем	31
Висновки до розділу 1	39
2 ПРОЦЕСИ У ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ У СКЛАДІ ГІБРИДНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	40
2.1 Порівняльний аналіз процесів у фотоелектричних системах у складі гібридних електростанцій при різних варіантах їх побудови	40
2.2 Аналіз характеристик фотоелектричних перетворювачів та акумуляторних батарей	46
Висновки до розділу 2	59
3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ГІБРИДНІЙ СУДНОВІЙ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ	60
3.1 Структура ФЕС	60
3.2 Конфігурація ФЕС	62
3.3 Алгоритм роботи ФЕС	67
3.4 Комп'ютерне моделювання і дослідження системи фотоелектричних перетворювачів	68
Висновки до розділу 3	73

4 СКЛАД ТА СТРУКТУРА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ СУДНОВОЇ ГІБРИДНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ	74
4.1 Мета створення експериментальної установки.....	74
4.2 Структура експериментальної установки	76
4.3 Огляд основних компонентів експериментальної суднової ФЕС	80
4.4 Принцип роботи суднової гібридної електричної станції	85
4.5 Особливості монтажу, експлуатації та безпеки суднових ГЕС	87
4.6 Порівняння з аналогами	89
Висновки до розділу 4.....	91
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	95
ДОДАТКИ	99

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

- АКБ – акумуляторна батарея.
- ВАХ – вольт-амперна характеристика.
- ВДЕ – відновлюване джерело енергії.
- ГЕС – гібридна електрична станція.
- ДБЖ – джерело безперебійного живлення.
- ДЕС – дизель-генераторна електростанція.
- ДГУ – дизель-генераторна установка.
- КЗ – коротке замикання.
- ККД – коефіцієнт корисної дії.
- ПНЕ – пристрій накопичення енергії.
- ПЧ – перетворювач частоти.
- РЛС – радіолокаційна станція.
- РШПС – розподілена шина постійного струму.
- СЕ – сонячний елемент.
- СЕЕС – судова електроенергетична система.
- СЕС – судова енергетична система.
- СКУ (BMS) – система контролю та управління.
- СМ – сонячний модуль.
- СТУ – стандартні тестові умови.
- СФЕП – система фотоелектричних перетворювачів.
- ФЕП – фотоелектричний перетворювач.
- ФЕС – фотоелектрична станція.
- BEES – Battery Energy Storage System.
- НІТ – Hetero junction with Intrinsic Thinlayer.
- PCS – Power Conversion System.
- STC – Standard Test Conditions.
- Ro-Ro – Roll on - Roll off.
- HPS, HRES – Hybrid Power System.

ВСТУП

Сучасний розвиток світової електроенергетики характеризується глибокою трансформацією, пов'язаною з дедалі більшою часткою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у складі електроенергетичних систем, ускладненням вимог до їх гнучкості. В умовах глобального енергетичного переходу ключовим завданням стає забезпечення надійності, стійкості та економічної ефективності енергопостачання при одночасному збільшенні використання змінних джерел енергії - сонячної та вітрової генерації.

Зазначені джерела відрізняються вираженою стохастичністю, непередбачуваністю та високою короткостроковою варіабельністю, що створює значне навантаження на електроенергетичні системи. Вирішення проблеми інтеграції ВДЕ вимагає застосування технологій, що забезпечують згладжування вироблення, компенсацію профілів навантаження, а також підвищення керованості, що робить гібридні енергетичні системи (Hybrid Renewable Energy Systems, HRES) одним із найперспективніших.

Гібридні електростанції, що поєднують кілька типів генерації та накопичувачі енергії, дозволяють підвищити стійкість системи, збільшити надійність енергопостачання, оптимізувати використання ресурсів, знизити експлуатаційні витрати та зменшити вуглецевий слід.

Інтеграція сонячної генерації (Photovoltaic, PV) до суднових електроенергетичних систем розглядається як один з ключових елементів декарбонізації флоту. Незважаючи на обмеженість доступної площі палуб, специфічні умови експлуатації та високі вимоги до надійності суднових систем, використання сонячних батарей поступово стає затребуваним завдяки зростанню ефективності PV-модулів, зниженню їх вартості та розвитку гібридних суднових електростанцій.

1 АНАЛІЗ ПОТОЧНОГО СТАНУ ТА МАЙБУТНІХ НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ ГІБРИДНИХ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

1.1 Аналіз існуючих рішень гібридних суднових електростанцій

Гібридна енергетична система (ГЕС, HRES, Hybrid Power System, HPS) є енергоустановкою, в якій одночасно використовуються два або більше джерела енергії, що функціонують під управлінням єдиної системи розподілу та оптимізації енергопотоків. Типове поєднання включає змінні відновлювані джерела (наприклад, сонячна та вітрова генерація), керовані джерела (дизельні або газові генератори, мала гідроенергетика, біомаса), а також накопичувачі електроенергії (акумуляторні батареї, гідроакумуляуючі установки, водневі системи).

Ключова особливість гібридних систем полягає в координації роботи різних компонентів через систему управління – EMS (Energy Management System), яка в режимі реального часу оптимізує структуру вироблення, обмін енергією з мережею, заряд і розряд накопичувачів, забезпечуючи мінімізацію витрат та високу якість електроенергії.

Гібридні системи можуть функціонувати у різних режимах:

- мережевому (grid-tied) — взаємодіють із магістральною чи розподільчою мережею, можуть постачати надлишки енергії чи отримувати недостатню енергію;
- автономному (off-grid) – не мають взаємодії з мережею та забезпечують повну незалежність;
- гібридному (grid-forming) — здатні формувати власну систему та забезпечувати стійкість після відключення від мережі.

Гібридні електростанції класифікують за наступними принципами.

За типом джерел енергії гібридні електростанції поділяються на:

1) ВДЕ + ВДЕ

- сонячна + вітрова генерація;
- сонячна + мала гідроенергетика;

- вітрова генерація + електростанції на біомасі;
- мульти-ВДЕ: PV-панелі + вітрова генерація + гідрогенерація.

Перевага таких систем – висока синергія профілів генерації.

2) ВДЕ + традиційна генерація

- PV-панелі + дизель-генератори;
- вітрова генерація + дизель-генератори;
- гідрогенерація + дизель-генератори.

Використовуються у мікромережах, віддалених районах, на промислових підприємствах.

3) ВДЕ + накопичувачі енергії

Сонячна або вітрова генерація комбінується з BESS (Battery Energy Storage System).

Це найшвидше зростаючий сегмент сучасного ринку.

4) Мультисистемні рішення

PV-панелі + вітрова генерація + BESS + дизель-генератори + гідрогенерація – високонадійні комплекси, що використовуються для великих автономних мікромереж, військових об'єктів та критичної інфраструктури.

Гібридні електростанції складаються з наступних основних компонентів:

1. Генератори - сонячні модулі, вітрові турбіни, гідрогенератори, біомаса, ДГУ.
2. Накопичувачі енергії — Li-іон, NaS, flow-батареї, гідроакумулюючі системи.
3. PCS (Power Conversion System) складається з інверторів, перетворювачів енергії, контролерів.
4. Система управління (EMS) виконує завдання прогнозування, оптимізації, диспетчеризації.
5. Система розподілу енергії складається з шин постійного та змінного струму, трансформаторів, комутаційних пристроїв.

6. Система моніторингу (SCADA) здійснює діагностику та контроль технічного стану.

1.2 Принципи побудови гібридних електростанцій з дублюючими дизель-генераторними установками

Через змінний характер графіків електроспоживання та енергетичного потенціалу відновлюваного джерела, до складу схеми енергосистеми, побудованої на відновлюваних джерелах електроенергії, має входити пристрій накопичення електроенергії. Узагальнена структура автономних вітрових та сонячних електростанцій показана на рис. 1.1.

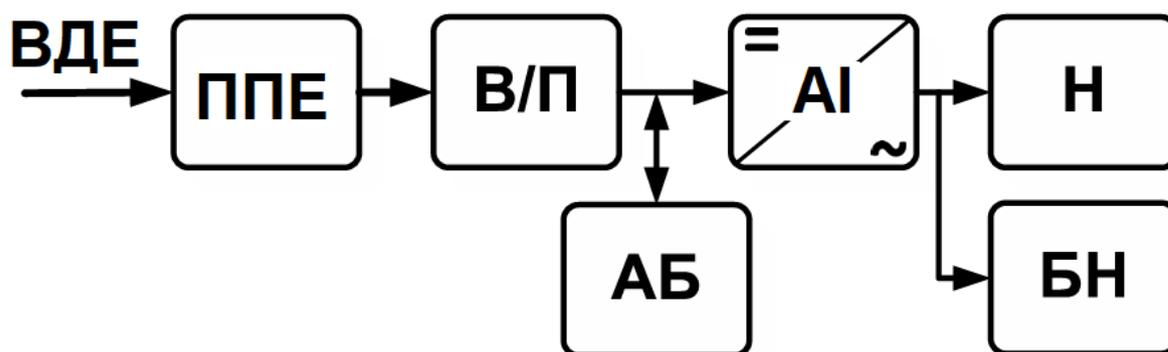


Рисунок 1.1 – Автономне устаткування відновлюваної енергетики:

ВДЕ – відновлюване джерело енергії, ППЕ – перетворювач первинного енергоресурсу, В/П – випрямляч або перетворювач електроенергії, АБ – аккумуляторна батарея, АІ – автономний інвертор, Н – навантаження, БН – баластне навантаження

У схемі, наведеній на рис. 1.1, навантаження через автономний інвертор живиться від аккумулятора. Пікова потужність навантаження визначається потужністю накопичувача та інвертора. Середня потужність навантаження на конкретному часовому інтервалі визначається позитивним енергетичним балансом накопичувача, коли його енергія, отримана від відновлюваного джерела енергії, перевищує енергію віддану у навантаження (з урахуванням коефіцієнтів корисної

дії та раціональних режимів роботи енергетичного обладнання, насамперед акумуляторних батарей). Баластне навантаження приймає можливі надлишки електроенергії, не затребувані в поточний часовий інтервал навантаженням та акумуляторною батареєю.

Очевидно, що для забезпечення енергоефективного режиму обладнання енергетичного комплексу, що розглядається, необхідна інтелектуальна система управління його елементами. У зв'язку з суттєвими добовими змінами потенціалу вітру та сонячного випромінювання, які зазвичай не відповідають сезонним та добовим змінам графіків енергоспоживання, електропостачання децентралізованих об'єктів тільки від поновлюваних джерел електричної енергії практично неможливо. Область їх застосування, як правило, обмежена окремими споживачами потужністю не більше одиниць кВт [2].

Поєднання гарантованого джерела електричної енергії – ДГУ та нестабільного ВДЕ дозволяє побудувати універсальні електроенергетичні системи з непоганими техніко-економічними характеристиками, що надійно забезпечують електропостачання різних об'єктів [3].

Варіант енергетичного комплексу з двома енергоджерелами кожен з яких здатний покривати у певні тимчасові інтервали потреби електричного навантаження характеризується максимумом можливостей із заміщення дизельної генерації енергією відновлюваного джерела. Скорочення часу роботи дизельної частини енергокомплексу забезпечує максимум економії дизельного палива та збільшує термін експлуатації ДГУ. Узагальнена схема гібридної системи електропостачання даного типу наведена на рис. 1.2.

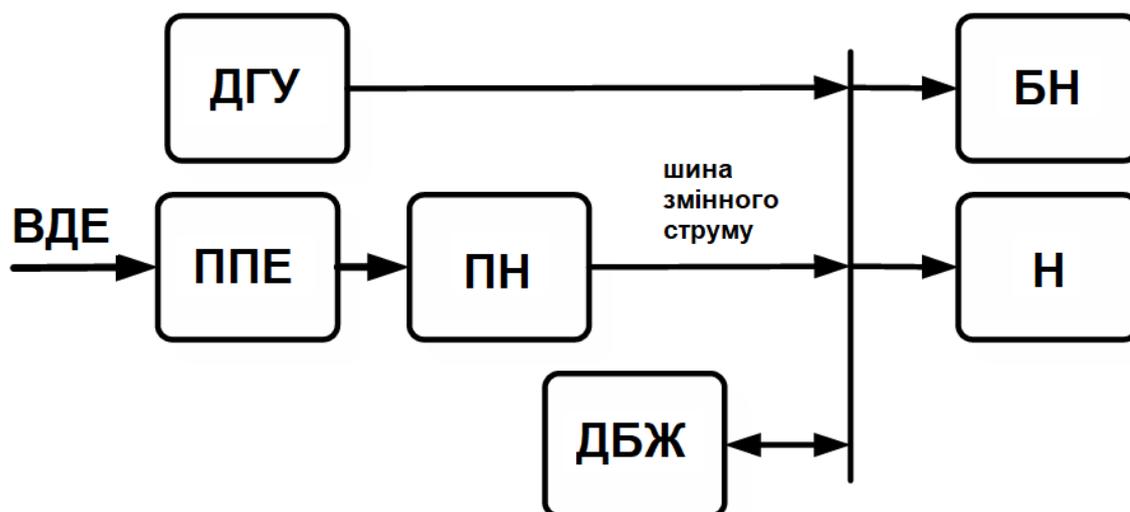


Рисунок 1.2 – Гібридний енергетичний комплекс із дублюючою ДГУ:

ДГУ – дизель-генераторна установка, ППЕ – перетворювач первинного енергоресурсу, ПН – перетворювач напруги, ДБЖ – джерело безперебійного живлення, Н – навантаження, БН – баластне навантаження

Схема гібридного енергетичного комплексу (рис. 1.2) передбачає поєднання різних джерел електроенергії на шині змінного струму. У період високого потенціалу відновлюваного енергоресурсу ДГУ вимикається. Коливання споживаної та генерованої від ВДЕ потужності демпфуються запасом енергії в акумуляторах ДБЖ, що дозволяє зменшити кількість запусків ДГУ. Залежно від співвідношення встановлених потужностей дизель-генераторних установок та установок відновлюваної енергетики в гібридному комплексі передбачаються роздільна робота цих джерел електричної енергії або режим їх паралельної роботи на загальне навантаження у певних ситуаціях.

Очевидно, режим роздільної роботи передбачає відносно велику встановлену потужність ППЕ відновлюваного джерела електричної енергії. Відповідно, миттєва потужність вітрової або сонячної електростанції може суттєво перевищувати номінальне навантаження. Для утилізації надлишкової електроенергії передбачається баластне навантаження БН. Частка «зеленої» електроенергії у загальному енергетичному балансі аналізованої системи електропостачання зазвичай становить щонайменше 50%.

За менших встановлених потужностей установок відновлюваної енергетики збільшується навантаження на дизельну генерацію. Зростання відносної тривалості режимів генерації ППЕ ВДЕ, яка є недостатньою для поточного покриття навантаження, визначає доцільність режимів паралельної роботи паливного та відновлюваного компонентів гібридної електростанції. Реалізація такого режиму вимагає додаткового ускладнення алгоритмів управління енергетичним комплексом, введенням у склад відповідного устаткування: універсального інвертора, здатного працювати автономно і паралельно з електричної мережею, пристрої синхронізації.

Подальшим розвитком інтелектуальних гібридних систем електропостачання є використання в них інверторних ДЕС [4]. Структура таких комплексів показана на рис. 1.3.

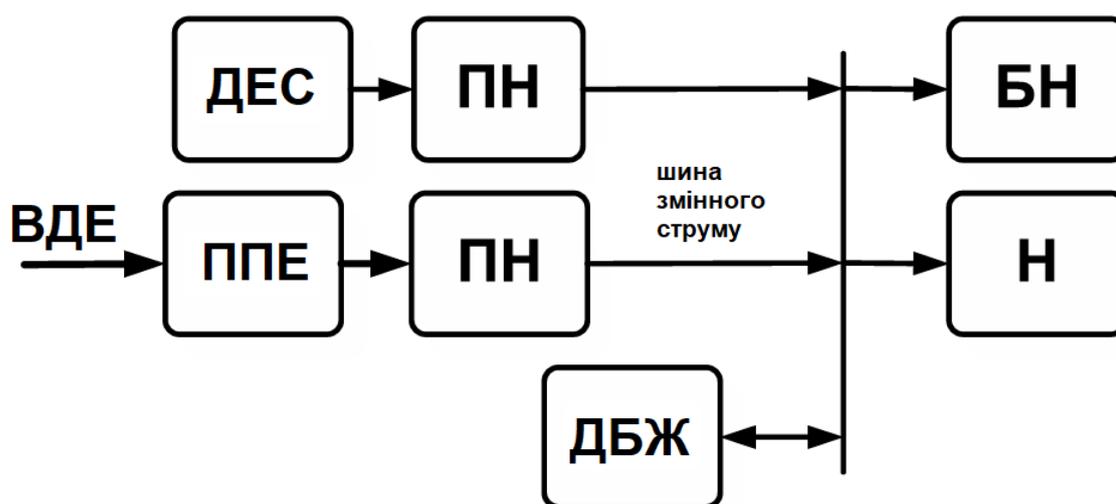


Рисунок 1.3 – Гібридний енергетичний комплекс з шиною змінного струму та інверторною ДЕС

Перевагою інверторної ДЕС є скорочення витрати палива в режимах малих навантажень за рахунок зниження частоти обертання дизель-генератора.

Зазвичай як перетворювач напруги ПН в таких системах використовуються випрямно-інверторні перетворювачі частоти (В-І). Ця обставина, а також генерація електроенергії фотоелектричними модулями на постійному струмі, визначають можливість об'єднання джерел електричної енергії гібридної системи

на шині постійного струму за допомогою випрямлячів або перетворювачів напруги (В/П).

Шина постійного струму є конкурентно-здатним варіантом побудови системи, що поєднує джерела електричної енергії різної фізичної природи (рис. 1.4).

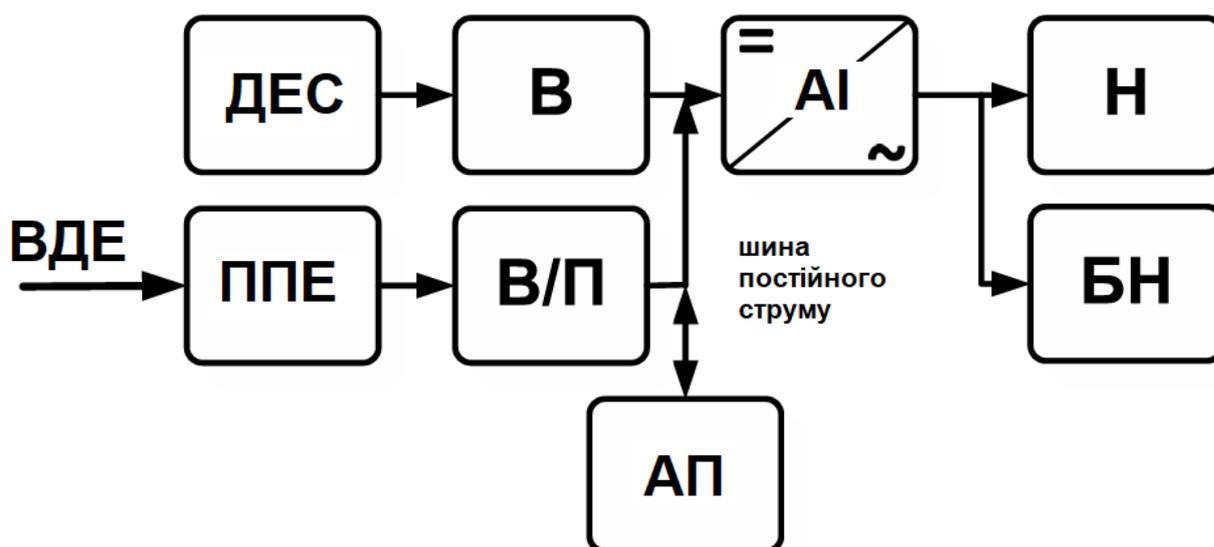


Рисунок 1.4 – Гібридний енергетичний комплекс із шиною постійного струму:

В/П – випрямляч або перетворювач напруги, АП – акумуляційний пристрій,

АІ – автономний інвертор

Слід відмітити, що переваги шини змінного струму виявляються при побудові системи розподіленої генерації.

Спільна робота в автономній системі електропостачання ДЕС та установок відновлюваної енергетики найбільш раціонально здійснюється як робота вітрової та фотоелектричної станції на електричну мережу, утворену дизельною електростанцією. ДЕС у разі розглядається як основне джерело електроенергії, а що у генерації відновлюваних джерел електроенергії дозволяє економити частину палива.

За умовами стійкості системи електропостачання, що визначається співвідношенням потужностей ДЕС та мережевих інверторів фото- або вітроелектростанцій, миттєва потужність відновлюваної частини енергетичного

комплексу не повинна перевищувати 40-50% потужності ДЕС. Співвідношення середніх значень потужностей відновлюваної та дизельної частин гібридного енергокомплексу орієнтовно складає 1/5. Структура такого комплексу наведено на рис. 1.5.

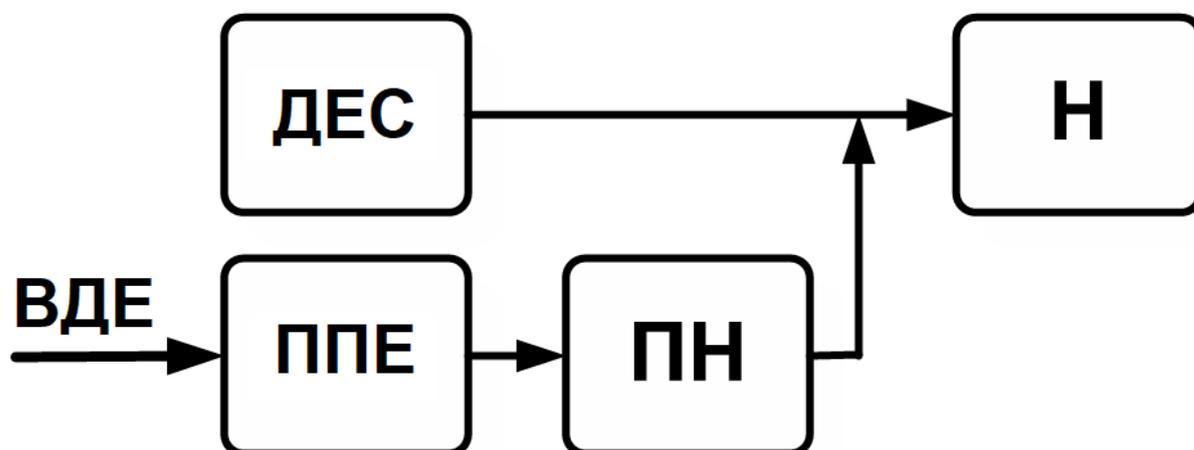


Рисунок 1.5 – Гібридний енергетичний комплекс із постійно працюючою ДЕС

Перевагою подібних комплексів (рис. 1.5) є їхня простота, що дозволяє знизити вимоги до системи управління та звести до мінімуму склад обладнання.

Недоліком таких комплексів є порівняно невеликий обсяг заміщення дизельної генерації.

1.3 Вибір складу і структури гібридного електроенергетичного комплексу та оцінка потенціалу сонячного випромінювання

Об'єкти відновлюваної енергетики в силу залежність від природних умов, різноманітних компоновок, складу, способу виконання робіт, взаємодії з довкіллям, здебільшого унікальні. Вибір оптимального варіанту проекту передбачає облік багатьох взаємопов'язаних факторів і проводиться за допомогою серії уточнюючих розрахунків.

До основних параметрів гібридного енергетичного комплексу, які підлягають обґрунтуванню у процесі проектування відносяться:

- оцінка енергетичних потреб об'єкта електропостачання;
- оцінка економічного потенціалу відновлюваного енергоресурсу;
- параметри енергетичного обладнання;
- встановлена потужність комплексу та його складових;
- параметри комунікацій.

На першому етапі необхідно оцінити енергетичні потреби об'єкта електропостачання. Характерною рисою децентралізованого споживача є різко змінний графік електричного навантаження протягом доби та року. Розрахункова електрична потужність автономного об'єкта електропостачання визначається за відомими методиками.

Для моделювання електричного навантаження об'єкта можна використовувати імовірно-статистичну модель, що задається виразом:

$$P_{pi} = \bar{P}_i + \beta\sigma(P_i), \quad (1.1)$$

де P_{pi} – розрахункове активне навантаження на i -й годині добового графіка; \bar{P}_i – математичне очікування навантаження на i -й годині добового графіка; β – коефіцієнт надійності розрахунку, який визначає ймовірність, з якою випадкові значення навантаження залишаться меншими від прийнятого розрахункового значення P_{pi} , $\sigma(P_i)$ – середнє квадратичне відхилення для i -ої ступені добового графіка.

Інтенсивність випромінювання на поверхні Сонця становить 70-80 тис. кВт/м² при температурі близько 6000°С. Сумарна потужність променистої енергії, що надходить до Земної атмосфери, дорівнює приблизно 180 000 млрд. квт. Кількість сонячної променистої енергії, що надходить за рік до атмосфери Землі становить колосальну величину – 1,5·10¹⁸ кВт·ч. Через відображення, розсіювання та поглинання її атмосферними газами та аерозолями лише 47% всієї енергії, або приблизно 7·10¹⁷ кВт·год, досягає поверхні Землі.

Інтенсивність сонячного випромінювання залежить від безлічі факторів: географічної широти, кута нахилу приймальної поверхні по відношенню до Сонця, місцевого клімату, хмарності, запиленості повітря, висоти над рівнем моря, сезону

року та доби. У середніх широтах вдень інтенсивність сонячного випромінювання досягає 800 Вт/м^2 влітку та $200 \dots 350 \text{ Вт/м}^2$ взимку, зменшуючись практично до нуля із заходом Сонця.

Спектральний склад і щільність потоку сонячного випромінювання у поверхні Землі змінюються залежно від довжини оптичного шляху світлових променів у атмосфері. Довжина цього шляху характеризується величиною, так званої оптичної атмосферної маси m , яка пов'язана з кутом α (кут висоти Сонця над горизонтом) залежністю $m = (\sin \alpha)^{-1}$.

Рівень інтенсивності потоку сонячного випромінювання в навколосемному космічному просторі прийнято позначати як AM0, на екваторі - AM1 ($m=1$), у середніх широтах при висоті сонця $41^\circ 49'$ - AM1,5 ($m=1,5$), при висоті Сонця 30° - AM2 ($m=2$), і т.д. На рис. 1.6 наведено залежності спектральної потужності $E(\lambda)$ сонячного випромінювання від довжини хвилі λ за різних значень атмосферної маси.

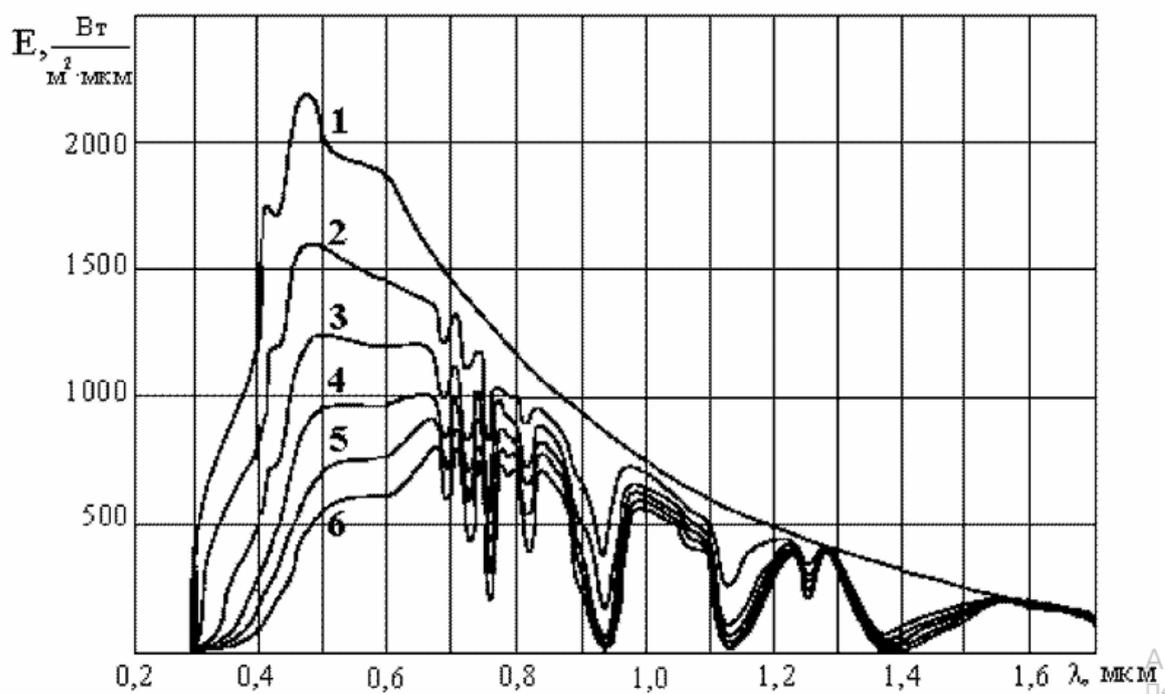


Рисунок 1.6 – Спектральний розподіл енергії сонячного випромінювання при різних значеннях атмосферної маси: 1 – AM0; 2 – AM1; 3 – AM2; 4 – AM3; 5 – AM4; 6 – AM5

Діапазоном видимого світла вважається ділянка довжин хвиль від 380 нм (глибокий фіолетовий) до 760 нм (глибокий червоний). Все, що має меншу довжину хвилі, має більш високу енергію фотонів і підрозділяється на ультрафіолетовий, рентгенівський та гамма-діапазони випромінювання. Незважаючи на високу енергію фотонів, самих фотонів цих діапазонах не так багато, тому загальний енергетичний внесок цієї ділянки спектра дуже малий. Все, що має більшу довжину хвилі, має меншу в порівнянні з видимим світлом енергію фотонів і поділяється на інфрачервоний діапазон (теплове випромінювання) та різні ділянки радіодіапазону. З графіка видно, що в інфрачервоному діапазоні Сонце випромінює практично стільки ж енергії, як і у видимому (рівні менші, зате діапазон ширший), а от у радіочастотному діапазоні енергія випромінювання дуже мала.

Приблизний розподіл енергетичного потоку сонячного випромінювання з різних спектральних діапазонів має такий вигляд:

- інфрачервоний діапазон та довші хвилі ($\lambda > 750$ нм та частота $F < 400$ ТГц) – 46,3 %;
- видимий спектр ($400\text{ нм} < \lambda < 750$ нм та частота 400 ТГц $< F < 750$ ТГц) – 44,6 %;
- ультрафіолетове випромінювання та вищі частоти ($\lambda < 400$ нм та частота $F > 750$ ТГц) – 9,1 %.

Тривалість сонячного саява у будь-якому пункті залежить від тривалості дня, від хмарності та зростає з півночі на південь.

У річному розрізі значне збільшення сонячної енергії припадає на березень-квітень, а суттєве зниження настає з жовтня місяця. Для південних та середніх широт на 5 холодних місяців (з жовтня до лютого) припадає від 10 до 20% річного значення потенціалу сонячної енергії. Для північних широт із наближенням до північного полярного кола ця величина знижується до нуля. Природний геліопотенціал характеризують сумарна сонячна радіація, що надходить на горизонтальну поверхню та тривалість сонячного саява на протязі року.

Кількість сонячної радіації, яку можна використовувати, збільшиться, якщо приймальну поверхню нахилити під деяким кутом, при цьому максимум буде

На рис. 1.7 застосовані наступні позначення: 1 – вертикальна площина; 2 – похила площина (Досліджуваний майданчик); 3 – горизонтальна проекція нормалі n ; 4 – горизонтальна площина; 5 – горизонтальна проекція сонячного променя; Z – вертикаль місцевості; n – нормаль до похилої площини; S – пряме сонячне випромінювання на поверхні Землі; α – висота Сонця; β – азимут Сонця; γ – азимутальний кут досліджуваного майданчика; θ – кут падіння прямого сонячного випромінювання; s – кут нахилу досліджуваного майданчика.

Кут падіння прямого сонячного випромінювання θ – кут між напрямом випромінювання на будь-яку поверхню та нормаллю n до цієї поверхні.

Схилення δ – кутове положення Сонця в сонячний полудень щодо площини екватора (значення позитивно для північної півкулі). Азимутальний кут площини γ – відхилення нормалі до площини від місцевого меридіана (відхилення на схід вважається покладом), на захід – негативним). Висота Сонця α – кут між напрямком прямого сонячного випромінювання та горизонтальною проекцією сонячного променя. Азимут Сонця β – кут між горизонтальною проекцією сонячного променя та напрямком на південь. Годинний кут ω – кут, що визначає кутове зміщення Сонця протягом доби. Опівдні година кут дорівнює нулю. Значення годинного кута до полудня вважається позитивним, після полудня негативним.

Для визначення сонячної радіації, що падає на нахилений досліджуваний плоский майданчик, використовується вираз

$$Q_{\text{накл}} = Q_{\text{пр}} + Q_{\text{рас}} + Q_{\text{отр}}, \quad (1.2)$$

де $Q_{\text{накл}}$ – пряме сонячне випромінювання, що падає на похилу поверхню, Вт/м²;

$Q_{\text{пр}}$ – пряме сонячне випромінювання, що падає на похилу поверхню, Вт/м²; $Q_{\text{рас}}$

– розсіяна сонячна енергія, яка падає на похилу поверхню, Вт/м²; $Q_{\text{отр}}$ –

випромінювання, відображене від Землі, Вт/м².

$Q_{\text{пр}}$ знаходять із виразу

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{отр}} \cos \theta, \quad (1.3)$$

де Q_{opt} - пряме сонячне випромінювання, що падає на ортогональну променів площину, Вт/м². Значення Q_{opt} Q можна знайти за формулою

$$Q_{opt} = \frac{Q_0 \sin \alpha}{\sin \alpha + c}, \quad (1.4)$$

Де Q_0 – сонячна постійна, 1370 Вт/м²; c – безрозмірна величина, що характеризує ступінь прозорості атмосфери. Для середньої прозорості $c=0,81$.

Кут падіння прямого сонячного випромінювання θ можна знайти з виразу

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos s - \sin \delta \cos \varphi \sin s \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos s \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin s \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin s \sin \gamma \sin \omega \quad (1.5)$$

де φ - географічна широта місця, радий; δ - схилення Сонця, рад; s - кут нахилу досліджуваної площини до горизонту, рад.

Значення схилення δ можна знайти за наближеною формулою

$$\delta = 0,41 \sin \left(\frac{360(284 + N)}{365} \right), \quad (1.6)$$

де N порядковий номер дня в році, що відраховується від першого січня.

Кут нахилу s розглянутого плоского майданчика до горизонту змінюється від 0 до $\pi/2$. Кут рівний 0 відповідає горизонтально розташованому майданчику, а $\pi/2$ - вертикально розташованому майданчику. Азимутальний кут майданчика γ може змінюватись у діапазоні від $-\pi$ до π . Кут $\gamma=0$ відповідає площині, яка орієнтована на південь, $\gamma = \pi/2$ – при орієнтації на південний схід, $\gamma = -\pi/2$ при орієнтації на південний захід. Годинний кут ω визначає кутове зміщення Сонця на протязі доби і складає $\pi/12$ на годину часу. Висоту Сонця (рис. 1.8) можна визначити з виразу

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega. \quad (1.7)$$

Азимут Сонця визначається виразом

$$\cos \beta = \frac{\sin \alpha \sin \varphi - \sin \delta \cos \omega}{\cos \alpha \cos \varphi} \text{sign}(\varphi). \quad (1.8)$$

Причем $\cos \theta_{zS} = \sin \alpha$.

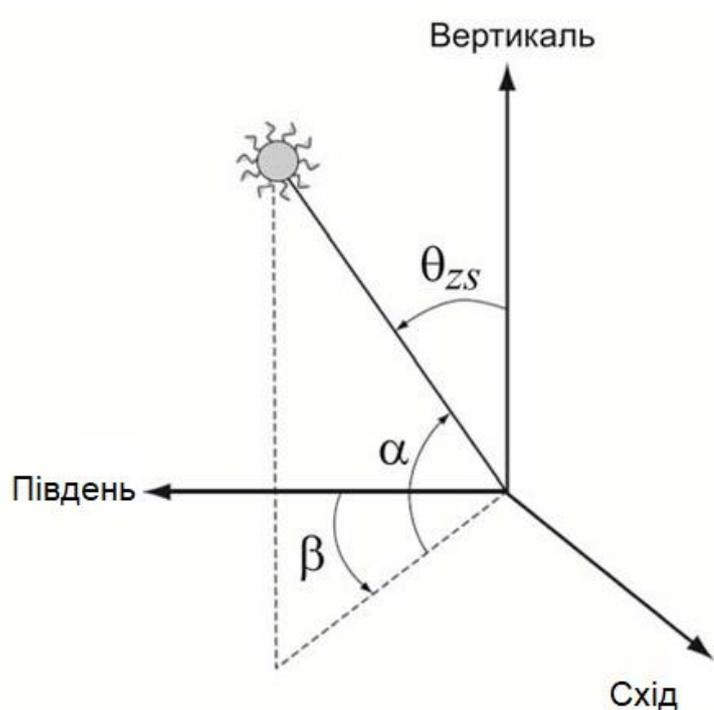


Рисунок 1.8 – Координати Сонця щодо географічно орієнтованої системи координат

Розсіяну сонячну радіацію $Q_{рас}$, що надходить на похилу площину, що розглядається, визначимо за виразом

$$Q_{рас} = Q_{рас_гор} \left[0,55 + 0,434 \cos \theta + 0,313 (\cos \theta)^2 \right], \quad (1.9)$$

де $Q_{рас_гор}$ - потік розсіяної сонячної енергії, що падає на горизонтальну площину.

Його можна визначити за формулою

$$Q_{рас_гор} = \frac{1}{3} (Q_0 - Q_{орг}) \sin \alpha. \quad (1.10)$$

Відбите від поверхні Землі і падаюче на похило встановлену площину випромінювання $Q_{отр}$, що враховується у виразі (1.2) для сумарного потоку сонячної радіації, зневажливо мало і його можна не враховувати.

Таким чином, використовуючи наведені вирази (1.2)–(1.10) можна розрахувати сумарну сонячну радіацію, що падає на нерухомий похилий плоский майданчик

$$Q_{\text{накл}}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) = Q_{\text{пр}}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) + Q_{\text{рас}}(\varphi, \omega, s, N). \quad (1.11)$$

Для того щоб врахувати зменшення потоку випромінювання за рахунок хмарності, можна використовувати емпіричні коефіцієнти a і b : a – коефіцієнт, який залежить від середовища (суша чи море) і від широти місця; b – коефіцієнт, який у даному випадку можна вважати постійним та рівним 0,38; n – кількість хмар у частках одиниці ($n=0$ при безхмарному небі, $n=1$ при суцільній хмарності). Тоді вираз для розрахунку сонячної радіації, що падає на довільний похилий майданчик в умовах хмарності, запишеться в вигляді

$$Q_{\text{накл}}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) = \left[Q_{\text{пр}}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) + Q_{\text{рас}}(\varphi, \omega, s, N) \right] \times [1 - (a + bn)n]. \quad (1.12)$$

Таким чином, задаючи кути орієнтації майданчика γ і s , використовуючи вирази (1.11) або (1.12), можна обчислити величину падаючої сонячної радіації для даної точки місцевості для будь-якого дня року та моменту часу. Для визначення питомої добової енергії, що надходить на похилий майданчик, необхідно провести інтегрування за виразом

$$W_{\text{уд_сут}}(N) = \frac{12}{\pi} (10^{-3}) \int_{\omega_k}^{\omega_n} Q_{\text{накл}}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) d\omega, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (1.13)$$

де ω_n , ω_k – годинні кути, що відповідають моментам часу початку та закінчення процесу опромінення поверхні, відповідно.

Також за цією методикою можна визначити оптимальне значення кута нахилу майданчика (сонячної панелі) для даного інтервалу часу (місяця, сезону, року). Для проведення розрахунків краще використовувати відомі математичні програмні пакети, наприклад, MATLAB.

Можливі кілька випадків орієнтації сонячних панелей у процесі їх роботи:

1) Установка за допомогою фотоелектричних датчиків та слідкуючих систем перпендикулярно потоку падаючого випромінювання. При цьому можливі варіанти стеження як по двох осях (азимуту та нахилу), так і по одній осі (нахилу).

2) Програмні розвороти сонячних панелей в залежності від розташування світила у вигляді спеціальних приводів. При цьому можливі варіанти поворотів як по двох осях (азимуту та нахилу), так і по одній осі (нахилу).

3) Дискретна посезонна (помісячна) зміна кута нахилу панелі. При цьому в азимуті панель орієнтується на південь.

4) Фіксоване положення панелі, як по куту нахилу, так і в азимуті, на весь період експлуатації.

З погляду енергоефективності перший варіант найкращий. Він дозволяє отримувати на 30% добової сонячної енергії, яка падає на панель, більше, але в той же час вимагає застосування дорогих приводів, що стежать, і спеціальних конструкцій стійок кріплення сонячних панелей. Вартість приводів можна порівняти з вартістю самих сонячних панелей.

Другий спосіб ефективності поступається першому на 3-5%, але для його реалізації можна використовувати розімкнений (без зворотного зв'язку) кроковий електропривод, що дещо знижує вартість, але вона буде також значною. Розглянуті вище способи, як правило, застосовуються для орієнтації концентраторів сонячної енергії сонячних електростанцій теплового типу. Для їх застосування в складі фотоелектричних станцій потрібно техніко-економічне обґрунтування.

Четвертий спосіб із фіксованою орієнтацією панелей на всьому проміжку експлуатації має найнижчу енергоефективність, але простий у реалізації. Він, як правило, застосовується в фотоелектростанціях різних потужностей.

Слід зазначити, що орієнтації в азимуті на південь здійснюватися не надто точно (з точністю у кілька градусів). Як показали дослідження, зміна азимуту у 15,0 зменшує надходження сонячної радіації на майданчик на 5%

Таким чином, використовуючи описану методику, можна розрахувати рівень питомої інсоляції для типового дня кожного місяця року за середніх умов хмарності для аналізованого місяця.

Помножуючи питому добову енергію сонячного випромінювання на кількість днів на місяці, отримуємо питому місячну енергію сонячного випромінювання у місці розміщення фотоелектростанції.

Зазвичай фотопанелі розміщуються під кутом нахилу, рівним широті території з орієнтацією на південь. Якщо кількість фотопанелей дозволяє з прийнятними трудовитратами проводити сезонні зміни кута нахилу, то слід враховувати цю особливість у процесі розрахунку.

Отриманий помісячний розподіл питомої енергії сонячного випромінювання для конкретної місцевості дозволяє вибирати обладнання фотоелектростанції та будувати енергетичні баланси автономної системи електропостачання.

Практичне поширення на даний час набув метод оцінки сонячного потенціалу за допомогою комп'ютерних баз даних, наприклад "NASA". За допомогою такого роду інформації, отриманої на основі даних глобальних метеоспостережень, можна з прийнятною точністю оцінити інтегральну енергію сонячного випромінювання у заданому районі з урахуванням реальної хмарності та орієнтації приймальної панелі у просторі. Цей підхід універсальний і дозволяє об'єктивно отримувати необхідну інформацію.

1.4 Сучасні тенденції і перспективи у розвитку гібридних суднових електроенергетичних систем

Скорочення споживання ресурсів, що витрачаються на генерування електричної енергії та покращення параметрів електричної мережі є одним із напрямків розвитку морського транспорту [4]. Міжнародна морська організація (ІМО) розробила чотири показника енергоефективності функціонування суден, якими є [5]:

- проектний індекс енергоефективності,
- план управління енергоефективністю судна,
- операційний показник енергоефективності,
- судновий індекс викидів енергоефективності.

Останнім часом було проведено багато досліджень з впровадженням енергоефективних суднових гібридних систем [6]. У роботі [7] було продемонстровано, що дизель-електричні гібридні системи можуть підвищити

паливну економічність тихохідних океанських суден. У статті [8] було змодельовано перше у світі пасажирське судно на паливних елементах (FCS Alsterwasser), використовуючи кілька стратегій управління енергоспоживанням, і автори дійшли висновку, що максимальна економія ККД за збереженням постійного відсотка SOC на 8% може заощадити 16,7% споживання водню. Було підраховано, що загальна ефективність рушія у цьому випадку могла бути покращено на 2-10%.

Розробка майбутніх суден націлена на нульовий рівень викидів, тому поєднання сонячної, вітрової та інших екологічно чистих джерел енергії та морських гібридних технологій може забезпечити нові вимоги до енергоефективності суден. Судна майбутнього повинні віддавати перевагу відновлюваним джерелам енергії таким, як суднове паливо [3]. Оскільки застосування виключно сонячної або вітрової енергії залежить від погодних змін і є нестабільним, поєднання електроенергії та відновлюваних джерел енергії може не тільки вирішити серйозну екологічну залежність від одного джерела енергії, а й відігравати роль регулювання загальної частоти електромережі судна, таким чином підтримуючи стабільну роботу СЕЕС. На даному етапі, оскільки відновлювана енергетика для СЕЕС все ще перебуває на початковій стадії, багато нових видів енергії не можуть бути ефективно застосовані для використання на реальних суднах. У цьому випадку у складі СЕЕС може бути використане поєднання відновлюваних джерел електричної енергії (наприклад, джерел сонячної енергії) та традиційних джерел електричної енергії. Оскільки сонячна енергія обмежена щільністю енергії, ефективність її перетворення недостатньо висока, тому сонячна енергія зазвичай використовується як допоміжне джерело енергії на великих суднах. Сонячна електростанція підключається до основної електроенергетичної системи судна через фотоелектричну систему виробітку електроенергії. Коли вихідна потужність фотоелектричної енергосистеми нестабільна, акумулятор може подавати живлення в основну електричну станцію судна для підтримки необхідної вихідної потужності. Дизельні генератори можуть використовуватися для

стабілізації коливань навантаження в СЕЕС судна, коли вихідна потужність як системи вироблення електроенергії, так і системи її накопичення нестабільна.

У майбутньому, коли розробка нових видів енергії буде поступово удосконалюватися, ймовірно, з'явиться поєднання нових джерел енергії для підтримки стабільної суднової електромережі та попиту на електроенергію, таку, як сонячна енергія, енергія вітру, хвиль, припливів, тощо, у поєднанні з судновою енергетичною системою, що працює на акумуляторні батареї. Акумуляторні батареї мають такі проблеми, як великий розмір та низький термін служби, тому для задоволення потреб судна в електроенергії в майбутньому можна скоординувати декілька видів енергії.

Порівняно із судновими розподільчими мережами змінного струму суднові мережі постійного струму мають такі переваги як надійність, ефективність, компактність і здатні обмежувати струми короткого замикання. Широкий огляд суднових мереж постійного струму, що мають різні конфігурації систем та перетворювачів потужності, наведений у [9]. З швидким розвитком напівпровідникових перетворювачів у систему виробітку електроенергії можуть бути інтегровані не тільки звичайні генератори та паливні елементи, а й відновлювані джерела енергії та пристрої накопичення енергії. Прикладом такої суднової електроенергетичної системи може бути система, зображена на рис. 1.9*.

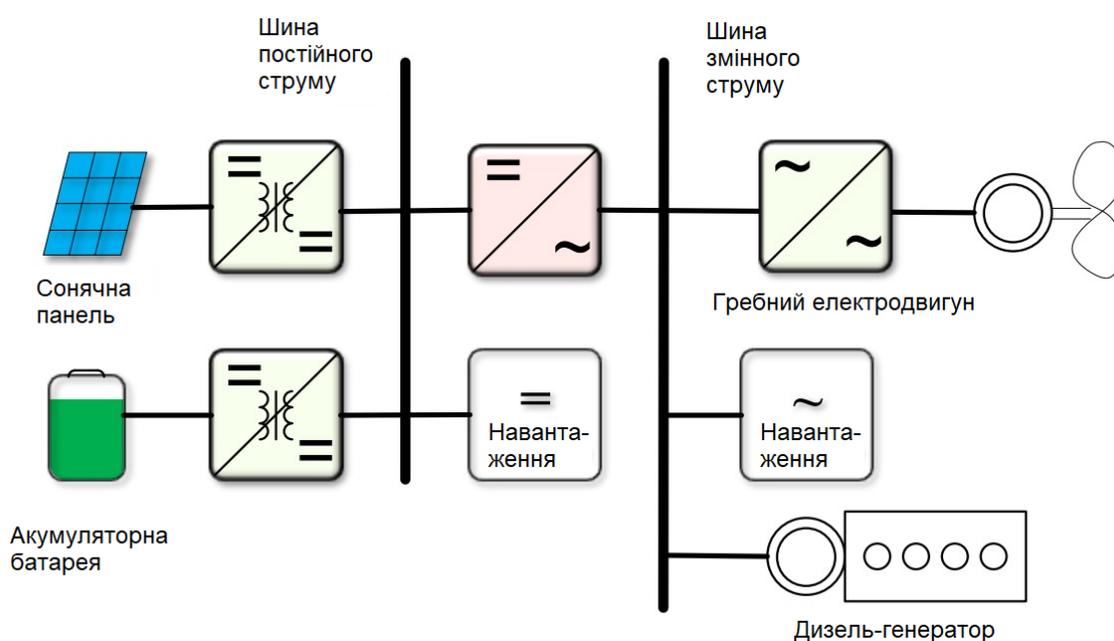


Рисунок 1.9* – Приклад суднової гібридної електроенергетичної системи

Структури сучасних СЕЕС значно різноманітніше, ніж структури традиційних наземних систем електропостачання. Крім того, питання проектування транспортних систем мають свою специфіку, яка враховує насамперед критерії ефективності, параметри електроенергії та електро-магнітну сумісність обладнання (особливості спільної роботи основних функціональних вузлів джерело-перетворювач, перетворювач-перетворювач) і у зв'язку з цим їх оптимізацію.

Як відомо, структура СЕЕС визначається споживачами електроенергії, а критеріями її ефективності служать маса, коефіцієнт корисної дії, показники надійності та якості електроенергії, сумарні витрати, пов'язані з вартістю та експлуатацією [10]. Найчастіше критерій маси для СЕЕС пріоритетним. Коефіцієнт корисної дії (ККД) СЕЕС визначає ефективність перетворення електроенергії. При оптимізації СЕЕС критерії маси та ККД суперечливі. Наприклад, зі збільшенням потужності джерела електроенергії, отже, і маси підвищується його ККД. Основні критерії надійності СЕЕС – інтенсивність відмов, ймовірність безвідмовної роботи та напрацювання до першої відмови.

Вимоги до якості електроенергії визначаються споживачами та безпосередньо впливають на конструктивні та схемні особливості, масу та вартість джерел та перетворювачів електроенергії. Крім того, розвиток науково-технічного прогресу вимагає розробки СЕЕС, які за технічними вимогами не повинні допускати перерв у електропостачанні. Тому сучасні СЕЕС повинні мати підвищену надійність, з чого слідує, що джерела і перетворювачі електроенергії слідує резервувати, а це призводить, відповідно, до збільшення маси та вартості самих систем [11].

При проектуванні СЕЕС необхідно враховувати умови роботи (насамперед – кліматичні) та особливості експлуатації (підвищені динамічні та вібраційні навантаження), а також проблему електромагнітної сумісності пристроїв через компактне розміщення обладнання.

Підвищення автономності функціонування СЕЕС, покращення їх масогабаритних показників при жорстких вимогах до них щодо якості

електроенергії та надійності електропостачання споживачів можливо на основі використання на судах малогабаритних систем з раціональною структурою побудови та оптимальними параметрами електроенергії в порівнянні з існуючими, що багато в чому залежить від правильного вибору перспективних приводних двигунів, джерел та перетворювачів, комутаційної апаратури [10].

Від параметрів електроенергії залежать інші характеристики СЕЕС, тому під час вибору виду струму i , відповідно, джерела необхідно враховувати вказані чинники. Системи змінного струму включають компактні електричні машини, перетворювачі електроенергії та комутаційні пристрої.

Важливим показником є потужність СЕЕС, від якої залежать критерії ефективності системи загалом. Значення її визначається споживачами. Для відповідальних споживачів необхідно створити оптимальний резерв джерел та перетворювачів [12, 13].

Розвиток напівпровідникових перетворювачів електроенергії та систем управління ними дає можливість безперервно покращувати характеристики перетворювачів як змінного, а й постійного струму. Застосування повністю керованих силових напівпровідникових приладів дозволить позбавитися складних пристроїв примусової комутації силових вентилів і повернутися до класичних, детально вивчених схем перетворення. Можливість вимикання таких приладів у будь-який момент часу спрощує побудову схем захисту перетворювачів за рахунок використання робочих вентилів у якості вимикачів.

Перспективним напрямком є розробка уніфікованих перетворювачів електроенергії на основі силових інтегральних схем з використанням мікропроцесорних систем управління, які керують силовими схемами за кількома алгоритмами таким чином, що уніфікований перетворювач може працювати у режимах випрямляча, інвертора та перетворювача частоти. Крім того, уніфіковані перетворювачі здатні пропускати потік енергії в обох напрямках [14].

Таким чином, на основі вищевикладеного можна зробити висновок, що СЕЕС є складним виробничим комплексом, для ефективної реалізації якого необхідний науковий підхід, що полягає у глобальній оптимізації. Остання передбачає

оптимізацію СЕЕС з урахуванням критеріїв ефективності, електромагнітної сумісності та структурно-параметричного синтезу. Досягнення подібного рівня глобальної оптимізації СЕЕС всім режимів роботи – важке завдання. Тому проектування перспективних СЕЕС має здійснюватися поетапно із використанням цифрових технологій.

Одне з рішень при проектуванні сучасних суден полягає у підвищенні ефективності та оптимальному управлінні електроенергетичною системою для зменшення споживання палива [15, 16]. Перспективним напрямом досліджень є гібридизація джерел генерування та пристроїв накопичення енергії (ПНЕ) з метою забезпечення конкурентоспроможної експлуатації транспортних засобів [17, 18].

Гібридні електростанції (ГЕС) стають все більш популярними і використовуються у якості рішень під час розробки сучасних суднових електроенергетичних систем [19]. Основні компоненти типової ГЕС з розподіленою шиною постійного струму (РШПС), як показано на рис. 1.10, включають джерела живлення, перетворювачі енергії, пристрої накопичування енергії (ПНЕ) і навантаження. Ключовою особливістю ГЕС є те, що вона включає кілька джерел живлення, які можуть доповняти один одного з можливістю генерації електроенергії для підвищення загальної ефективності системи.

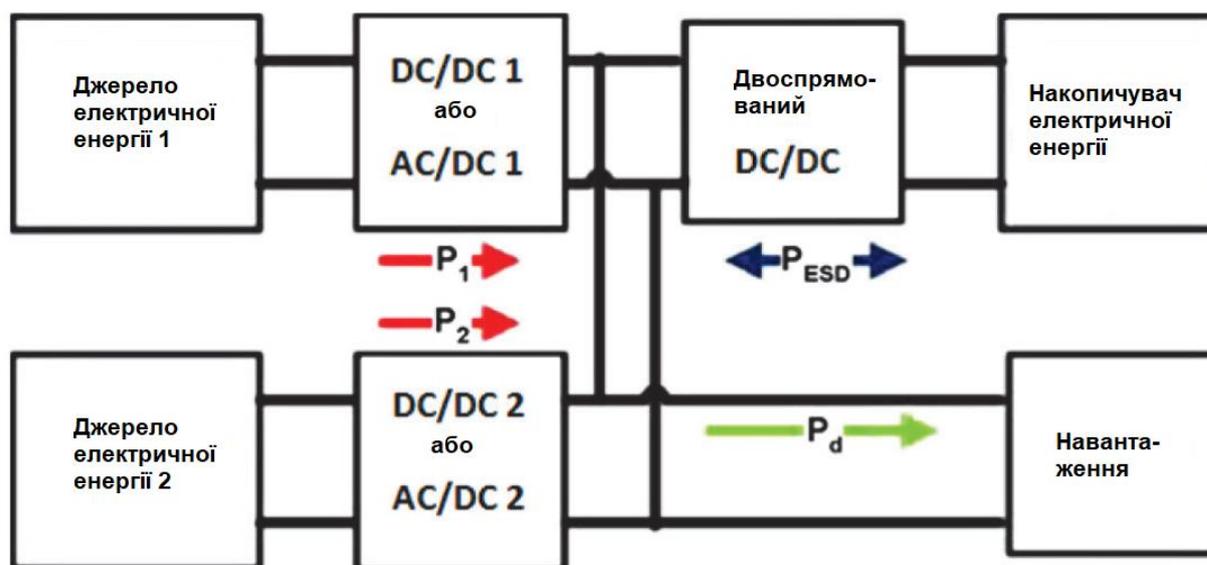


Рисунок 1.10 – Структура гібридної суднової електроенергетичної системи з розподіленою шиною постійного струму

Переважна більшість сучасних морських суден використовують системи розподілу змінного струму, включаючи єдині електроенергетичні системи (ЄЕЕС). Однак із впровадженням силових електронних перетворювачів в енергосистеми все частіше стали застосовуватися на суднах мережі постійного струму з інтеграцією джерел та пристроїв накопичення електричної енергії, підключених до РШПТ [20, 21]. Система розподілу постійного струму допомагає скоротити кількість ступенів перетворення при застосуванні джерел та пристроїв постійного струму.

Однак при побудові РШПТ зберігаються проблеми, пов'язані з необхідністю синхронізації блоків генерації, управління потоком реактивної потужності, пускових струмів трансформаторів, гармонійних складових електричних параметрів і трифазних дисбалансів. Суднова система живлення постійного струму дозволяє первинним рушіям працювати на своїх оптимальних швидкостях, забезпечуючи значну економію палива в порівнянні зі звичайними системами змінного струму. Вона також пропонує додаткові переваги, такі як економія місця та ваги, а також гнучке розташування обладнання [22].

ГЕС мають перспективне значення, коли в процесі експлуатації існують великі коливання у споживаній потужності. Вимоги проектування систем цього можуть істотно відрізнятися щодо різних типів судів. При всіх існуючих в даний час варіантах гібридні силові установки є дуже перспективними технологіями для проектування щодо малих суден і мають такі переваги [23]:

- ГЕС забезпечують кращу енергоефективність, значне скорочення викидів парникових газів та забруднюючих речовин, ніж класичні системи;
- гібридні системи є модульними та забезпечують резервування потужності;
- застосування електричних силових установок (підрулюючих пристроїв типу “Azipod”) дозволяє покращити маневреність при значному зниженні шуму та вібрацій;
- електричні силові установки забезпечують більший ступінь свободи з погляду планування розміщення обладнання та дозволяють вивільнити на борту судна доступний простір;

– ГЕС дозволяє знизити рівень вібрації, що передається на конструкцію судна;

– ГЕС дозволяє знизити вимоги до обслуговування двигунів внутрішнього згоряння внаслідок оптимального режиму експлуатації.

Гібридизація силових ланцюгів заснована на розподілі або одночасному використанні декількох різних джерел енергії [24], вибір та комбінація яких призначені для покращення параметрів енергетичних систем. Даний напрямок є одним з вирішень для мінімізації витрати палива особливо для суден, що вимагають високого ступеня маневреності та різноманітних робочих циклів [12].

Розробку сучасних суден можна поділити на два основні етапи. Перший - короткостроковий етап, у якому поєднання нових форм енергії та традиційної енергетики може грати перехідну роль. Традиційні види енергії можуть сприяти стабільності гібридної енергосистеми. На довгостроковому етапі, після того, як новий вид енергії буде добре розроблений та втілений у практичне застосування, поєднання кількох екологічно чистих джерел енергії також може вказати шлях подальшого розвитку в галузі суднобудування та судноремонту.

Таким чином, суднова гібридна технологія може знизити викиди та підвищити ефективність використання енергії за рахунок координації між кількома джерелами енергії. Поєднання пристроїв відновлюваної енергетики з низьким або навіть нульовим рівнем викидів та пристроїв традиційних форм суднової енергетики може не лише знизити витрати палива, а й підвищити загальну ефективність суднової енергетичної системи. Суднова гібридна енергетична система може стати одним із важливих напрямів розвитку суднової техніки майбутнього.

Висновки до розділу 1

Розділ присвячено критичному аналізу застосування та розвитку гібридних електростанцій суднового призначення та обґрунтування структурних схем і архітектури таких електричних джерел у складі СЕЕС.

1. Виконаний аналіз існуючих рішень побудови гібридних електростанцій дозволив встановити переваги та обмеження їх застосування у складі СЕЕС.

2. Визначені принципи побудови судових гібридних електростанцій з дублюючими дизель-генераторними установками та розглянуті структурні схеми таких систем.

3. На основі оцінки потенціалу сонячного випромінювання обґрунтований вибір складу і структури гібридного електроенергетичного комплексу суднового призначення.

4. Розглянуті сучасні тенденції і перспективи у розвитку гібридних судових електроенергетичних систем та запропоновані рішення, що відповідають техніко-економічним вимогам щодо їх застосування.

2 ПРОЦЕСИ У ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ У СКЛАДІ ГІБРИДНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

2.1 Порівняльний аналіз процесів у фотоелектричних системах у складі гібридних електростанцій при різних варіантах їх побудови

Для локальних СЕЕС на основі дизельних електростанцій додатковими обмеженнями на використання ФЕС у їх складі є неможливість відключення ДЕС та вимога забезпечення споживачів електричною потужністю ДЕС не менше 40% потужності гібридної сонячно-дизельної електростанції. При ненадійній електричній мережі застосовують ФЕС з акумуляторними батареями, які набагато складніші, але дозволяють створювати системи безперебійного електропостачання споживачів. Потужність інвертора в таких системах визначається за сумарною потужністю навантаження, яке потрібно жити під час аварій у мережі, а тривалість аварій визначає ємність АБ та встановлену потужність сонячної батареї.

Для забезпечення максимально ефективної роботи акумуляторна фотоелектрична система, з'єднана з мережею, вимагає використання спеціалізованого автономного інвертора.

Можливі три варіанти побудови таких систем:

1). Сонячні батареї заряджають АКБ через контролер заряду, потім енергія через інвертор передається у мережу (у навантаження).

2). Сонячні батареї працюють на мережевий фотоелектричний інвертор, від якого живиться навантаження, залишки енергії використовуються для заряду АКБ, а якщо АКБ заряджені, то поступають у мережу.

3) Гібридна система, яка включає елементи обох перелічених типів.

Структурна схема фотоелектричної системи з контролером заряду наведена на рис. 2.1

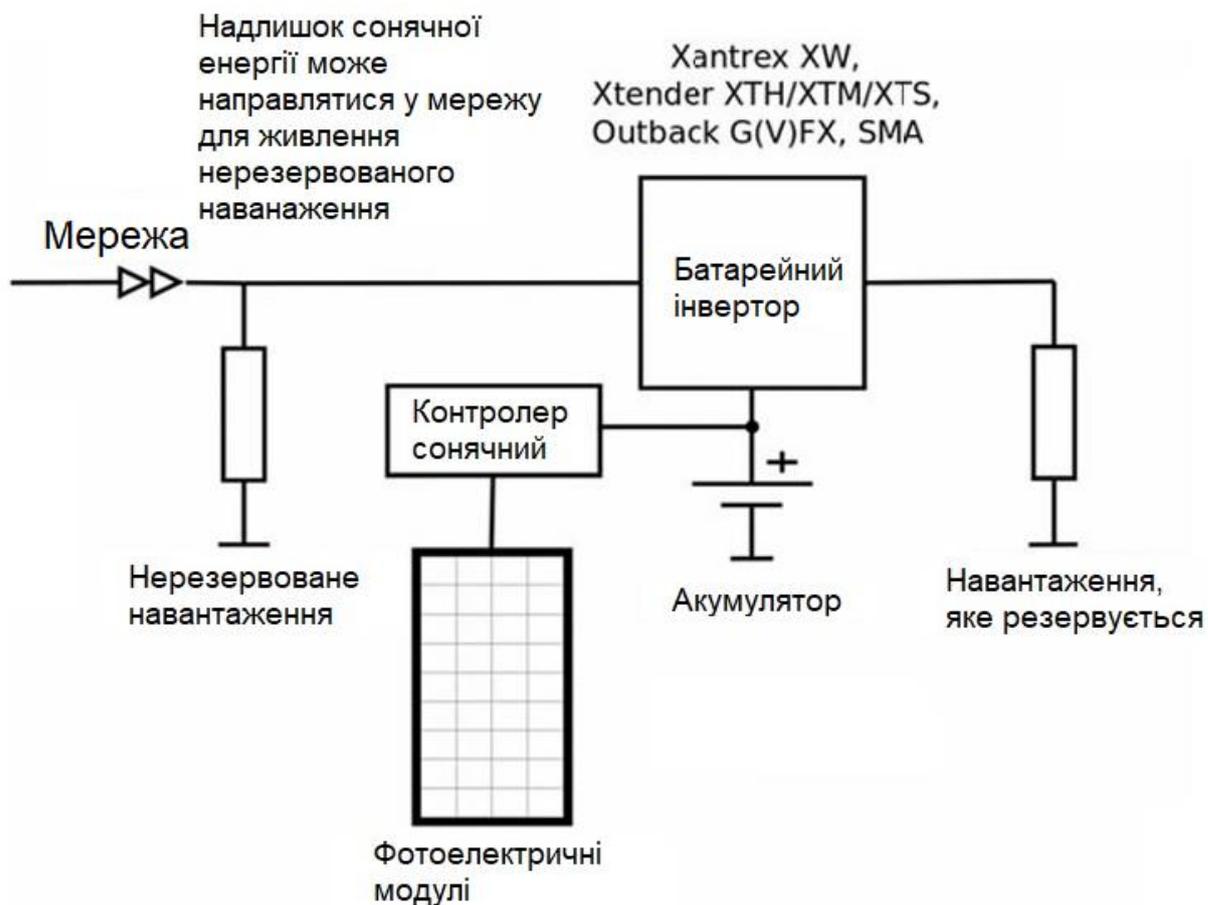


Рисунок 2.1 – Структурна схема мережевої фотоелектричної системи с контролером заряду

Варіант побудови ФЕС, наведений на рис. 2.1, є найбільш простим та розповсюдженим. У даній системі заряд акумуляторів від сонячних батарей відбувається через контролер заряду постійного струму.

При використанні стандартного джерела безперебійного живлення (ДБЖ), при наявності мережі заряд акумуляторів відбувається від мережі, тому сонячні батареї практично не застосовуються. Для максимального використання енергії, яка виробляється ФЕП, застосовується контролер МРРТ і спеціальний інвертор з функцією передавання електричної енергії в навантаження або в мережу при напрузі на АКБ вище заданої. У цьому випадку, навіть якщо АКБ повністю заряджені, електрична енергія від ФЕП прямує у навантаження, тим самим зменшуючи її споживання від мережі.

Якщо навантаження споживає менше електричної енергії, ніж виробляють ФЕП, такий інвертор може або спрямовувати її надлишки в мережу, або зменшити її вироблення ФЕП за рахунок підвищення напруги на акумуляторах.

Перевагами таких систем є можливість використання сонячної енергії, як за наявності мережі, так і під час відключень; можливість відновлення роботи при тривалих перервах в електропостачанні та глибокий розряд акумуляторів шляхом заряду АКБ від ФЕП.

До недоліків слід віднести подвійне перетворення сонячної електричної енергії, що призводить до додаткових втрат у контролері, інверторі, частково в акумуляторах; циклічний режим роботи акумуляторів при перервах у електропостачанні від основних джерел (ДЕС), що призводить до їх швидкого зношування.

Для побудови ФЕС даного типу можуть бути використані дуючі моделі інверторів: Xtender ХТН/ХТМ, SMA Sunny Island, Xantrex ХW, RichElectric CombiPlus, Outback GFX/GVFX та ін.

При аваріях у мережі інвертор починає перетворювати енергію від акумуляторів. Якщо ФЕП підключені через контролер заряду до акумуляторів, інвертор використовує електричну енергію від ФЕП, і, якщо його не вистачає, то і енергію з акумуляторів. Якщо сонячної енергії більше, ніж потрібно для споживачів, вона йде на заряд акумуляторів.

Фотоелектрична система електропостачання з мережним інвертором на вході ДБЖ представлена на рис. 2.2.



Рисунок 2.2 – Структурна схема мережевої фотоелектричної системи с контролером заряду постійного струму

Перевагами схеми побудови ФЕС, наведеної на рис. 2.2 є можливість застосування мережевого та автономного інверторів з мінімальним набором опцій, широко представлених на ринку багаточисельними виробниками. Акумулятори постійно перебувають у зарядженому стані, експлуатуються в буферному режимі та використовуються тільки при відключенні основної мережі.

ФЕС такого типу доцільно використовувати у системах електропостачання, у яких основне споживання сонячної електричної енергії має місце вдень, а відключення основного електропостачання від ДЕС рідкісні та недовгі [25–29].

Вдень мережевий інвертор забезпечує електричною енергією всіх споживачів, зокрема і резервованих. Надлишки електричної енергії направляються у основну мережу лише у випадках, коли споживання менше, ніж генерують ФЕП, при цьому енергія сонця використовується і на заряд АКБ. Ефективність мережевих інверторів, як правило, становить більше 90%, що забезпечує добрі

енергетичні, показники усієї системи електропостачання. Єдиним недоліком є припинення використання енергії сонця при аваріях у мережі.

Потужність ДБЖ у таких системах вибирається за потужністю резервованого навантаження і не залежить від потужності ФЕП. Потужність мережного інвертора може бути, як більшою, так і меншою за потужність ДБЖ. Для забезпечення відновлення системи при глибокому разряді акумуляторів у схемі електростанції можна передбачити невеликий ФЕП, який підключається до АКБ через контролер заряду (показаний пунктиром). Якщо відключення короткочасно, то ці елементи можна не використовувати.

Найбільш універсальними є фотоелектричні системи з мережним інвертором на виході ДБЖ (рис. 2.3). У цій схемі побудови електростанції також використовується вискоелективний мережний інвертор, але на відміну від схеми, наведеної на рис. 2.2, за відсутності напруги мережі ФЕП продовжують жити навантаження, що резервується, і заряджати акумулятори.

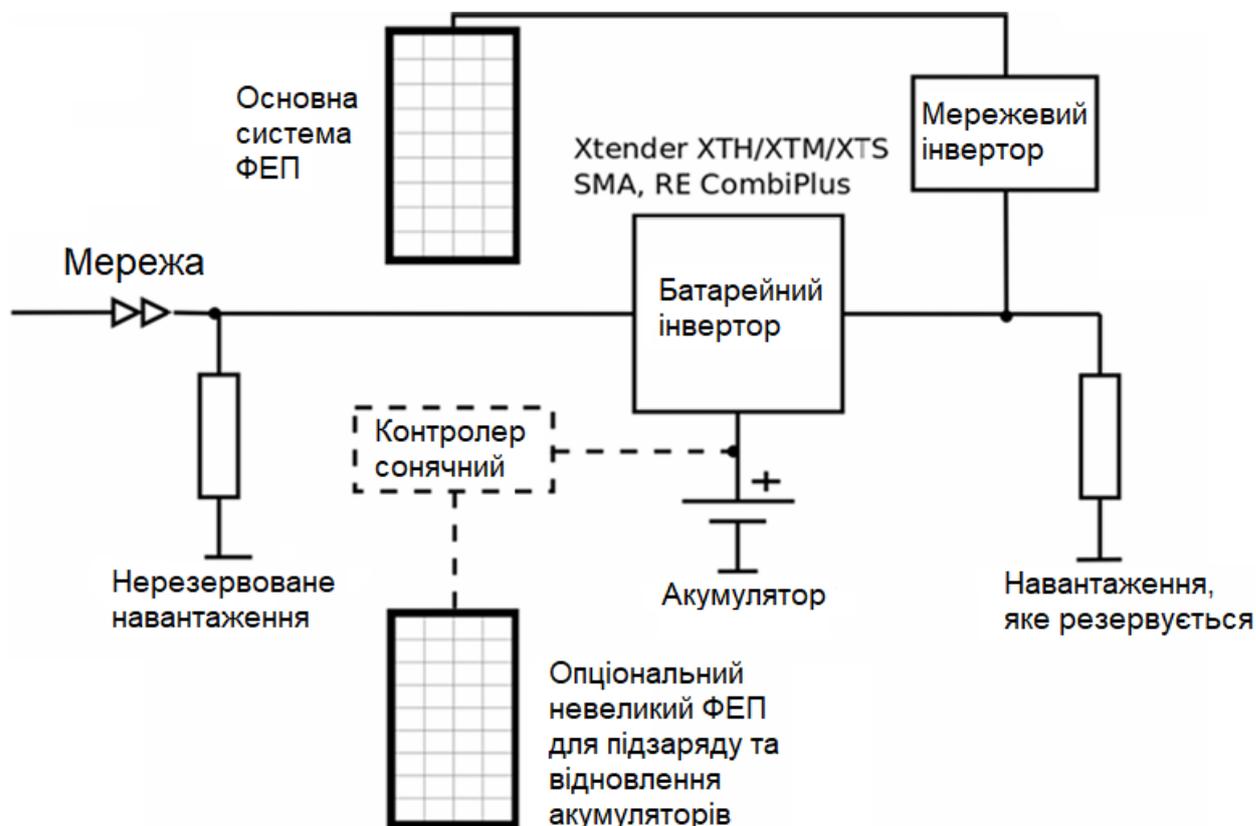


Рисунок 2.3 – Мережева фотоелектрична система електроживлення з мережним інвертором на виході ДБЖ

У нормальному режимі, за наявності напруги у мережі, мережевий інвертор забезпечує електричною енергією резервоване навантаження, при цьому ККД перетворення інвертора дуже високий - понад 90-95%. Якщо навантаження споживає менше, ніж виробляють ФЕП, надлишки електричної енергії ідуть на заряд акумуляторів. Якщо навантаження споживає більше - то електрична енергія, що бракує, береться з мережі. Після повного заряду акумуляторів надлишки електричної енергії спрямовуються в загальну мережу та живлять інше навантаження.

При аварії у мережі ДБЖ перемикається на роботу від акумуляторів та одночасно забезпечує опорну напругу для мережевого інвертора. Тому при такої конфігурації сонячна енергія продовжує використовуватися і при аваріях у мережі. Як і при наявності мережі, надлишки електричної енергії отриманої від Сонця, спрямовуються на зарядження акумуляторів.

Якщо напруга у мережу не поступила, але вийшла за межі допустимих значень, то інвертор відключається від мережі та продовжує жити відповідальне навантаження струмом від ФЕП та АКБ. Навантаження, підключене до інвертора, живиться напругою, яка є у мережі.

Перевагами системи є ефективне використання АКБ (робота у буферному режимі), ефективне використання відновлюваної сонячної енергії, можливість відновлення при глибокому розряді акумуляторів при використанні невеликого ФЕП, підключеного к АКБ через контролер заряду.

До недоліків розглянутої системи слід віднести необхідність застосування спеціальних гібридних автономних інверторів, які можуть заряджати АКБ з виходу, а також спрямовувати надлишки сонячної енергії в мережу. Такий інвертор повинен або давати сигнал на вимкнення мережевого інвертора, або підвищувати частоту на виході для керування мережевим інвертором. Слід вказати, що більшість мережевих інверторів припиняють роботу при виході параметрів частоти за задані межі. Для побудови таких систем необхідні моделі інверторів, які забезпечують виконання вище перерахованих функцій, наприклад, Steca Xtender XTH/XTM, SMA Sunny Island, Xantrex XW, RichElectric CombiPlus та ін.

Виконаний порівняльний аналіз схем побудови ФЕС показує, що застосування мережевих інверторів та схем включення, показаних на рис. 2.2 та рис. 2.3, в більшості випадків підвищує ефективність системи, особливо якщо більшість сонячної енергії споживається в денний час. Застосування спеціальних ДБЖ з можливістю заряду АКБ з виходу дозволяє використовувати мережеві фотоелектричні інвертори навіть під час перерв у електропостачанні від основної мережі.

Проведений аналіз показав, що схеми побудови фотоелектричних систем досить різноманітні, при цьому ефективність всієї енергетичної системи багато в чому визначатиметься складом і характеристиками енергетичного обладнання, що використовується.

2.2 Аналіз характеристик фотоелектричних перетворювачів та акумуляторних батарей

Основними перетворювачами сонячної енергії в електричну, які входять до складу фотоелектричної станції, є так звані сонячні батареї (фотоелектричні модулі, фотоелектричні перетворювачі) які уявляють собою набір тонких пластин монокристалічного кремнію (хоча застосовуються полікристалічні та аморфні).

Елементи з'єднані плоскими провідниками на склі або прозорому пластику, зі зворотної сторони пластини кремнію заламеновані поліефірною плівкою або спеціальним герметикам для захисту від окислення контактів та вологи. Кількість пластин (елементів) залежить від прийнятої конструкції батареї і зазвичай підбирається так, щоб струм і напруга відповідали умовам зарядки акумуляторів. Елементи бувають розміром 85x85 мм 100x100 мм, 125x125 мм або у формі кола відповідного діаметра. Залежно від розміру елементів, змінюються розміри готової батареї. ККД батареї зазвичай лежить у діапазоні 10.5 – 13.5%, хоча у лабораторіях отримані результати до 18%, ще більший ККД мають батареї на елементах з арсеніду галію, але вони рідкісні та дорогі. Для виведення енергії встановлюють спеціальні роз'єми.

Структура ФЕП (сонячного елемента) показана на рис. 2.4 та рис. 2.5.

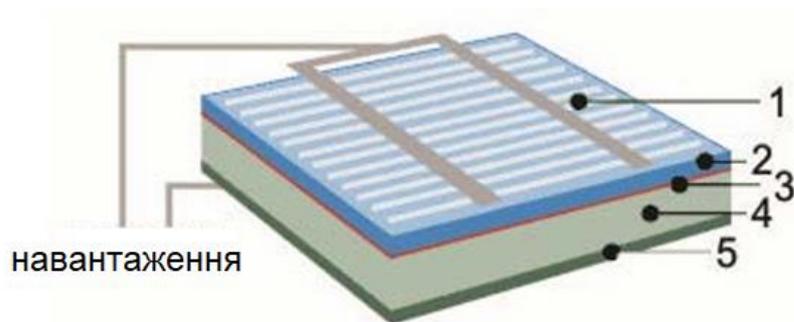


Рисунок 2.4 – Структура сонячного елемента (ФЕП):

1 – передній контакт; 2 – негативний шар; 3 - провідний шар; 4 – позитивний шар;
5 – задній контакт

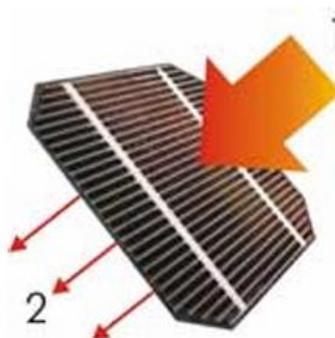


Рисунок 2.5 – Структура сонячного елемента (ФЕП):

1 – сонячне світло, 2 – інфрачервоні промені

Усі сонячні елементи (ФЕП) прозорі для інфрачервоної області спектра, що призводить до меншої нагрівальності елементів на сонці та відповідно до збільшення їх ефективності. Сонячні елементи (СЕ), фотоелектричні перетворювачі (ФЕП) – синоніми первинного перетворювача, що здійснює пряме перетворення сонячної енергії в електричний струм.

Електрично з'єднані сонячні елементи створюють базову основу для сонячних модулів (СМ), які є базовими елементами ФЕС. Залежно від застосування, сонячні модулі можуть мати різні конструктивні рішення і різні вихідні потужності.

Існує кілька способів збільшення енергоефективності, наприклад, вибір раціонального кута установки, т.к. сонце протягом року постійно змінює висоту

над обрієм. Інший шлях полягає у збільшенні продуктивності, це повертати сонячну батарею слідом за сонцем протягом дня. Таким чином, можна збільшити вироблення енергії аж до 50% від виробітку в стаціонарному положенні. Енергія, отримана від сонячних батарей, спрямовується на зарядку акумуляторів, що необхідно з двох причин: згладжування нерівномірності надходження енергії, наприклад у хмарну погоду, та задоволення потреб у енергії тоді, коли немає сонячного випромінювання (вночі). Потужність сонячних модулів може досягати 10...300 Вт.

Для отримання необхідної потужності та робочої напруги модулі з'єднують послідовно або паралельно. Таким чином одержують фотоелектричний генератор. Потужність генератора завжди менше, ніж сума потужностей модулів – через втрати, обумовлені відмінністю в характеристиках однотипних модулів (втрат на неузгодженість). Чим ретельніше підібрані модулі в генераторі (чи, ніж менше різниця в характеристиках модулів), тим менше втрати на неузгодженість. Наприклад, при послідовному з'єднанні десяти модулів з розкидом показників 10% втрати становлять приблизно 6%, а при розкиді 5% – зменшуються до 2%.

При затіненні одного модуля (або частини елементів у модулі) в генераторі при послідовному з'єднанні виникає “ефект гарячої плями” – затінений модуль (елемент) починає розсіювати потужність, що виробляється освітленими модулями (елементами), швидко нагрівається і виходить з ладу. Для усунення цього ефекту паралельно з кожним модулем (або його частиною) встановлюють шунтуючий діод. Діод необхідний при послідовному з'єднанні понад двох модулів. До кожної лінійки (послідовно з'єднаних модулів) теж підключається блокуючий діод для вирівнювання напруги лінійок. Всі ці діоди зазвичай розміщуються в сполучній коробці модуля.

Вольтамперна крива генератора має той самий вигляд, як і одиничного модуля. Робоча точка генератора, підключеного до навантаження, не завжди збігається з точкою максимальної потужності (тим більше, що положення останньої залежить від умов освітленості та температури навколишнього середовища). Підключення таких навантажень, як, наприклад, електродвигун,

може зрушити робочу точку системи в область мінімальної чи навіть нульової потужності (і двигун просто не запуститься). Тому, важливий компонент сонячних електричних систем – перетворювачі напруги, здатні узгоджувати сонячний модуль із навантаженням.

СЕ виробляє електричну енергію, коли освітлюється світлом. Залежно від інтенсивності світла (вимірюється у Вт/м²), сонячний елемент (ФЕП) виробляє більше або менше електричної енергії: яскраве сонячне світло краще, ніж тінь, і тінь краща, ніж електричне світло. Для порівняння ФЕП та модулів необхідно знати так звану номінальну потужність елемента чи модуля. Номінальна потужність, виражена у ВАТ пікової потужності W_p , це міра того, скільки електроенергії може зробити фотоелектричний модуль при оптимальних умовах.

Для визначення та порівняння номінальної потужності сонячних панелей, вихідна потужність вимірюється при стандартних тестових умовах (СТУ). Ці умови передбачають: - освітленість 1000 Вт/м² - сонячний спектр АМ 1.5 (він визначає тип і колір світла) - температура елемента 25 °С (це важливо, оскільки ефективність ФЕП (СЕ) падає у разі підвищення його температури).

Як було показано раніше, системи ФЕП доцільно використовувати в складі ФЕС, які, у свою чергу входять до складу автономних електроенергетичних системах, у тому числі СЕЕС.

Для забезпечення ФЕС енергією у темний час діб або у періоди без яскравого сонячного світла необхідно застосовувати акумуляторні батареї (рис. 2.6).

Основними умовами щодо вибору акумуляторів є:

- стійкість до циклічного режиму роботи;
- здатність витримувати глибокий розряд;
- низький саморозряд;
- некритичність до порушення умов зарядки та розрядки;
- довговічність;
- простота в обслуговуванні.

Важливий параметр переносних (або періодично демонтуємих) сонячних систем – компактність та герметичність. Цим вимогам повною мірою

задовольняють акумулятори, виконані по технологіям “dryfit” та AGM (абсорбований електроліт) або рекомбінаційної технології. Вони характеризуються відсутністю експлуатаційних витрат і перекривають діапазон ємностей 1 ... 12000 Ач. Гази, що виділяються при зарядці, не виходять з акумулятора, тому електроліт не витрачається та обслуговування не потрібно.



Рисунок 2.6 – Акумуляторні батареї у складі ФЕС

Для отримання необхідної робочої напруги акумулятори або акумуляторні батареї послідовно з'єднують. При цьому:

- застосовують акумулятори тільки одного типу, випущені одним виробником;
- використовують усі акумулятори одночасно, не роблячи відводів від окремих елементів;
- не з'єднують акумулятори в одну групу з різницею в даті випуску більш як на місяць;
- забезпечують різницю температур окремих акумуляторів не понад 3°C.

Для продовження терміну служби акумуляторів при циклічному режимі роботи у складі ФЕС важливо не допускати їх глибокого розряду. Ступінь розряду характеризується глибиною розряду, що виражається у відсотках від номінальної ємності акумулятора.

Експлуатація акумуляторів при глибокому розряді призводить до необхідності їх частішої заміни та обслуговування - і, відповідно, до подорожчання системи. Глибину розряду акумуляторів у сонячних системах прагнуть обмежити на рівні 30...40%, що досягається відключенням навантаження (зниженням потужності) або використанням акумуляторів більшої ємності. Тому для управління процесом зарядки до складу ФЕС обов'язково включають контролери заряду - розряду акумуляторної батареї.

Для підбору кількості та типу акумуляторів використовують два основних параметра: конструкція інвертора (напруга на низькій стороні) та струм зарядки, який може надходити від кількох джерел і не повинен перевищувати 10% від номінальної ємності для кислотних акумуляторів та 25-30% від номінальної ємності для лужних. Якщо в інверторі є зарядний пристрій від мережі, то він повинен автоматично регулювати зарядний струм залежно від ступеня заряду акумуляторів. До необхідних властивостей акумуляторів, які застосовуються у ФЕС, необхідно віднести і низький рівень саморозряду. До акумуляторів, що застосовуються в ФЕС, пред'являються специфічні вимоги, у тому числі: для роботи в автономних системах використовуються спеціальні акумулятори з терміном служби до 10 і більше років.

Для контролю за станом акумуляторної батареї часто при змінюють регулятори зарядки-розрядки. Щоб захистити батарею від надмірної розрядки, навантаження має бути вимкнене, коли напруга батареї падає нижче напруги відключення. Навантаження не повинно підключатись до моменту, коли напруга не зросте до певного порога (напруги підключення). Ці значення залежать від конструкції певних батарей, технологічного процесу та терміну служби батарей. Щоб захистити батарею від перезаряджання необхідно обмежити зарядний струм після досягнення напруги закінчення заряджання. Напруга почне знижуватися, доки досягне іншого порога, так званої напруги відновлення заряду.

У регуляторах передбачають такі види захисту: від короткого замикання у навантаженні; від підключення акумуляторної батареї зворотною полярністю;

температурна компенсація значень порогової напруги (це буває необхідно, якщо передбачається експлуатація батарей при температурах нижче $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Найбільш перспективним при розробці суднових ГЕС є застосування літій-іонних акумуляторів. Характеристики деяких типів літій-іонних акумуляторів наведені у додатку А. У якості прикладу розглянемо характеристики акумулятора LT LFP 300. Криві розряду акумулятора різними струмами при температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ наведені на рис. 2.7. Криві розряду акумулятора струмами $0,2/0,5/1/1,5 C_n$ при різних індивідуальних робочих температурах представлені на рис. 2.8 – рис. 2.11.

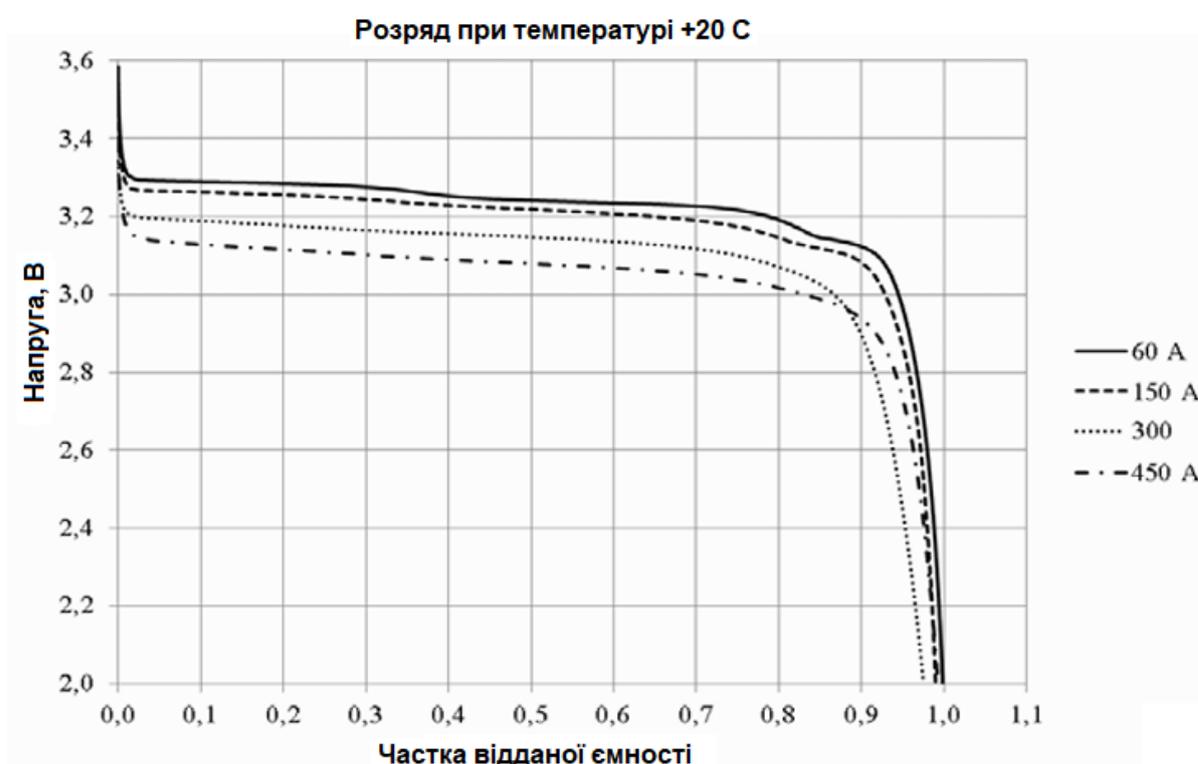


Рисунок 2.7 – Криві розряду акумулятора LT LFP 300 різними струмами при температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

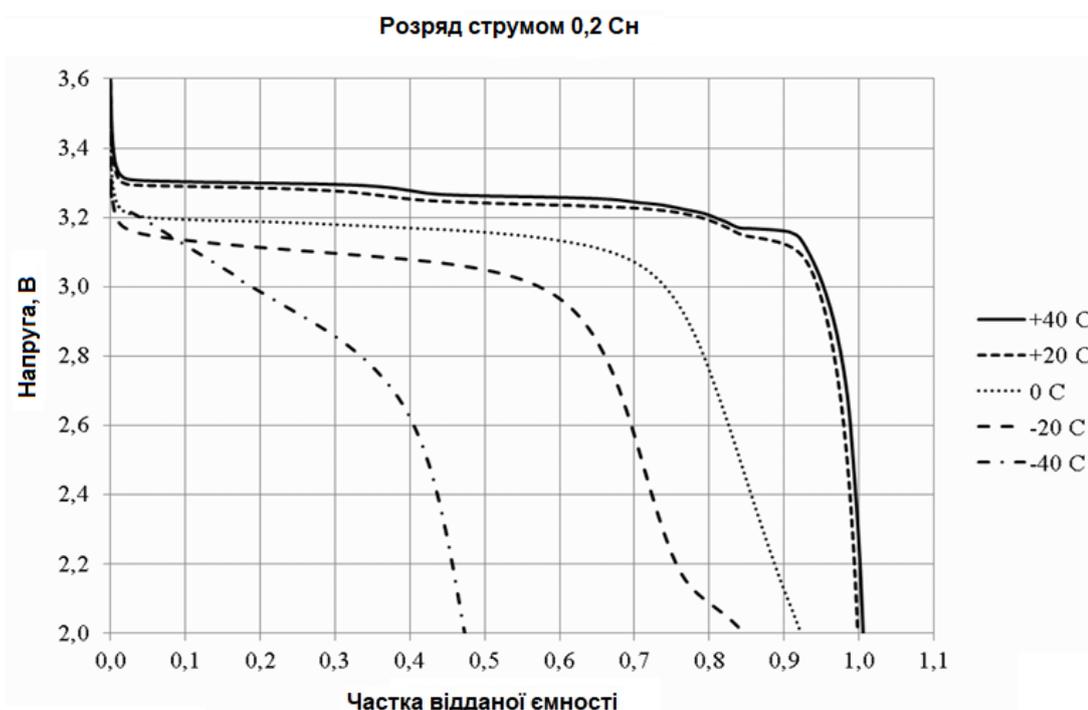


Рисунок 2.8 – Криві розряду акумулятора струмом 0,2 С_н при різних індивідуальних робочих температурах

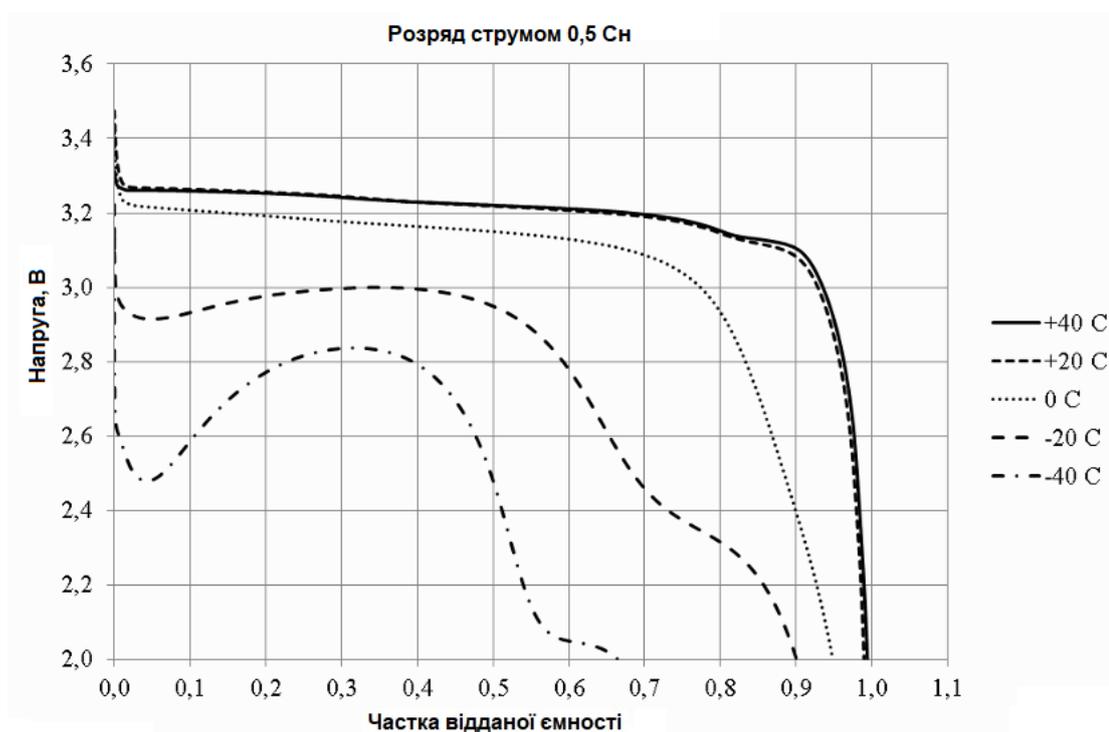


Рисунок 2.9 – Криві розряду акумулятора струмом 0,5 С_н при різних індивідуальних робочих температурах

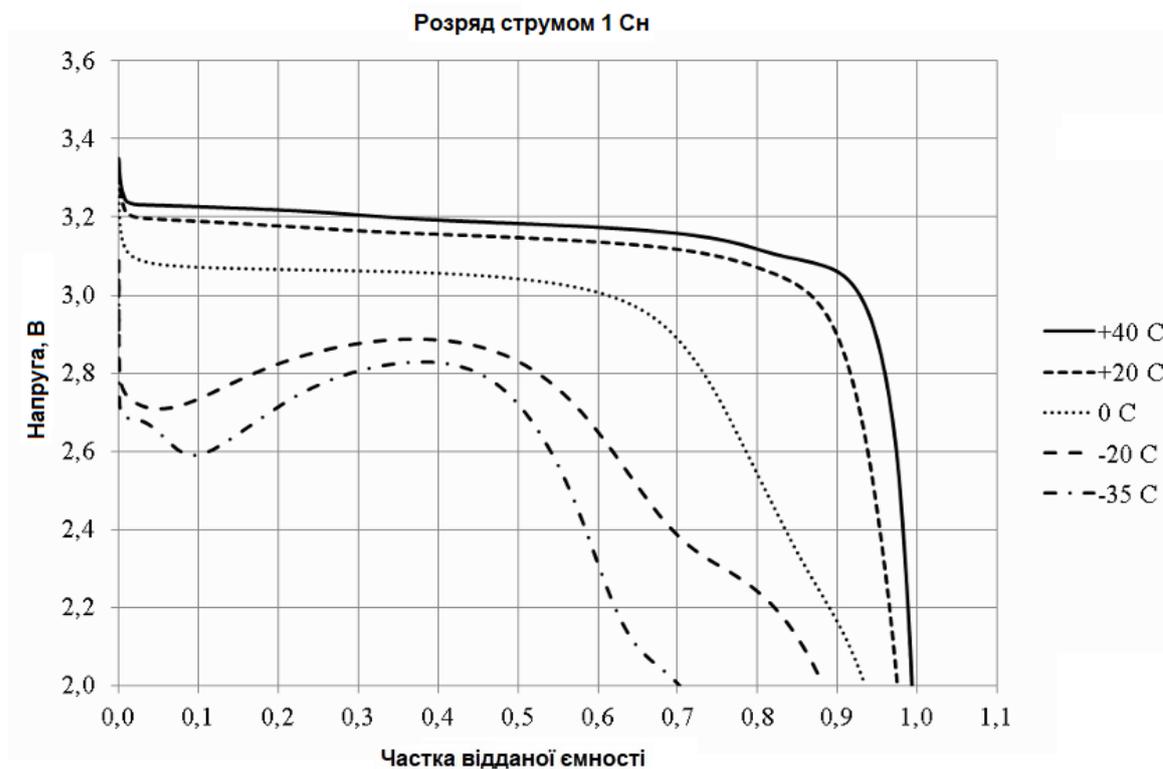


Рисунок 2.10 – Криві розряду акумулятора струмом $1,0 C_n$ при різних індивідуальних робочих температурах

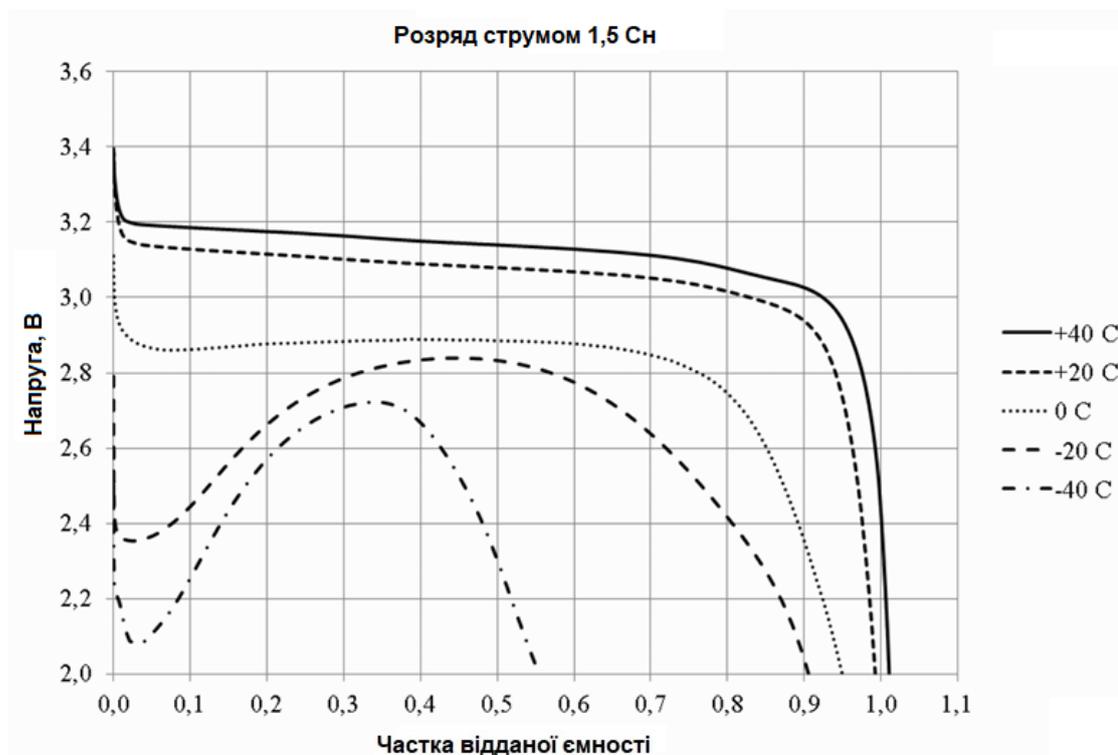


Рисунок 2.11 – Криві розряду акумулятора струмом $1,5 C_n$ при різних індивідуальних робочих температурах

Експлуатація акумуляторів у складі акумуляторної батареї без системи контролю та управління (СКУ, BMS) не допускається.

СКУ має виконувати наступні функції:

- вимірювання напруги на кожному акумуляторі,
- вимірювання температури на кожному акумуляторі,
- вимірювання зарядного/розрядного струму батареї,
- вирівнювання (балансування) напруг на акумуляторах, з'єднаних послідовно при заряді батареї,
- відключення батареї від навантаження при напрузі на будь-якому акумуляторі нижче 2,5 В і від зарядного пристрою (ЗП) при напрузі на будь-якому акумуляторі вище 3,7 В, при температурі будь-якого акумулятора вище 60°C, при перевищенні струму короткого замикання, що протікає через батарею вище 5С_н.

В залежності від завдань, які вирішуються при створенні ФЕС, допустимо застосування як пасивного, так і активного способів балансування. Максимально допустимий розкид ємностей окремих акумуляторів у складі батареї складає ±5%. Максимально допустимий розкид внутрішніх опорів окремих акумуляторів у складі батареї складає ±10%.

Напруга заряду акумуляторної батареї визначається за формулою:

$$U_{AB} = U_{AKK} \cdot N,$$

де U_{AB} – напруга заряду батареї, U_{AKK} – середня напруга заряду окремого акумулятора, N – кількість акумуляторів в батареї.

Особливості літій-іонних та літій-полімерних акумуляторів такі, що при наближенні їх заряду до 100%, відбувається нелінійне зростання його поляризаційного потенціалу. У випадку застосування великої кількості акумуляторів, з'єднаних послідовно, внаслідок розкиду їх параметрів (ємності, внутрішнього опору) зростає розкид напруг на них. Це може привести до передчасної зупинки заряду батареї внаслідок досягнення напруги на окремому акумуляторі 3,7 В. Тому рекомендується знизити середню напругу на окремому акумуляторі у режимі заряду до 3,4 В – 3,5 В.

Особливості роботи акумуляторної батареї в режимі заряду.

Заряд окремих акумуляторів необхідно здійснювати від спеціального зарядного пристрою (ЗП) у режимі постійного струму (номінальний струм заряду $I_n=0,2C_n$) до досягнення кінцевої напруги заряду $U_{акк}$, далі в режимі постійної напруги до досягнення заряду струму $0,2I_n$.

Необхідно контролювати полярність підключення акумуляторів та напругу на акумуляторі. Кінцева напруга окремого заряду акумулятора не повинна перевищувати 3,7 В.

Для заряду акумулятора рекомендується використовувати ЗП, що забезпечує мінімальний рівень пульсації струму. Рекомендований рівень пульсації – не більше 5А на 100 Ач ємності акумуляторної батареї.

Рекомендована напруга заряду на входних клеммах акумуляторної батареї – 3,38 В. Рекомендована напруга підтримуючого заряду на входних клеммах акумуляторної батареї – 3,35 – 3,36 В.

Через відсутність механічних частин акумуляторні батареї можуть допомогти пом'якшити швидкі коливання, коли електрична мережа працює на максимальній потужності.

На основі вищевикладеного можна відмітити переваги та недоліки ФЕС.

До переваг ФЕС, у яких застосовується сонячна енергія можна віднести:

1. Відновлюваність.
2. Достатність.
3. Постійність. Сонячна енергія невичерпна і постійна.
4. Доступність. Сонячна енергія доступна в кожній точці світу.
5. Значний термін експлуатації. Виробники сонячних панелей гарантують їхню працездатність протягом 30–50 років.

6. Екологічна чистота. У світлі останніх тенденцій в боротьбі за екологічну чистоту Землі, сонячна енергетика є найбільш перспективною галуззю, що частково замінює енергію, одержувану від невідновлюваних паливних ресурсів і, тим самим, виступає важливим етапом на шляху захисту клімату від глобального потепління. Виробництво, транспортування, монтаж і використання сонячних електростанцій практично не супроводжується шкідливими викидами в атмосферу.

Навіть якщо вони і присутні в незначній мірі, то в порівнянні з традиційними джерелами енергії, їхній вплив на навколишнє середовище можна вважати майже відсутнім.

7. Безшумність. У ФЕС на сонячному ресурсі немає ніяких рухомих вузлів, як, наприклад, в турбогенераторах. Вироблення електроенергії відбувається безшумно.

8. Економічність.

9. Низькі експлуатаційні витрати. Обслуговування систем енергопостачання на сонячних батареях полягає у тому, що лише кілька разів на рік необхідно очистити сонячні елементи від забруднення. 1

10. Широкі межі застосування.

11. Застосування інноваційних технологій. Із кожним роком технології виробництва сонячних батарей стають все більш досконалішими. Сучасні досягнення у сфері нанотехнологій і квантової фізики дозволяють говорити про можливе збільшення у найближчий час потужності сонячних панелей у 3 рази.

Проте сонячна енергетика має і недоліки:

1. Висока вартість. Сонячна енергія належить до розряду дорогого ресурсу. Окупність сонячної енергетичної установки може сягати 15 років.

2. Мінливість. Оскільки сонячне світло відсутнє в нічний час, а також у похмурі та дощові дні, сонячна енергія не може бути основним джерелом електроенергії.

3. Висока вартість акумулювання енергії. Акумуляторні батареї, що дозволяють накопичувати енергію і згладжувати нестабільність надходження сонячної енергії, наразі високо вартують.

4. Деяке забруднення навколишнього середовища. Незважаючи на те, що в порівнянні з виробництвом і переробкою інших видів енергоресурсів сонячна енергія найбільш дружня до природного середовища, деякі технологічні процеси виготовлення сонячних панелей супроводжуються викидом парникових газів, трифторида азоту і гексафториду сірки [25]. Сучасні технології виробництва акумуляторних батарей також достатньо енергозатратні.

5. Застосування дорогих і рідкісних компонентів. При виробництві сонячних панелей застосовують, наприклад, телурид кадмію (CdTe) або селенід міді-індію галію (CIGS), які є рідкісними і дорогими речовинами, що тягне за собою подорожчання системи альтернативного енергопостачання загалом.

6. Мала щільність потужності. Одним із важливих параметрів джерела електроенергії є середня щільність потужності, яка вимірюється в Вт/м² і характеризує кількість енергії, яку можна отримати з одиниці площі енергоносія. Для сонячного випромінювання цей показник становить 170 Вт/м². Це більше, ніж у інших відновлюваних природних ресурсів. Через це для вироблення електроенергії з сонячного тепла потрібна достатня площа сонячних панелей.

Тому вважаю, що застосування ФЕС у складі суднової ГЕС доцільно саме на суднах типу Ro-Ro, де є достатньо площі на верхній палубі для розміщення систем ФЕС.

Висновки до розділу 2:

1. Проведений аналіз процесів у фотоелектричних системах у складі гібридних електростанцій показав, що схеми побудови фотоелектричних систем досить різноманітні та вимагають застосування спеціалізованого енергетичного обладнання. При цьому ефективність всієї електроенергетичної системи багато в чому визначатиметься складом і характеристиками енергетичного обладнання, що використовується.

2. Проведений аналіз процесів у фотоелектричних перетворювачах та акумуляторах дозволив визначити переваги та недоліки застосування ФЕС у складі суднових ГЕС.

3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ГІБРИДНІЙ СУДНОВІЙ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Розділ присвячений комп'ютерному моделюванню процесів взаємодії систем фотоелектричних перетворювачів з елементами гібридної суднової електроенергетичної системи, розробці алгоритмів роботи схеми управління, аналізу отриманих результатів і вибору конфігурації фотоелектричної електростанції в якості резервного джерела електропостачання на судах типу Ro-Ro.

Принцип резервного електропостачання не припускає постійне використання сонячної енергії. Акумуляторна батарея заряджається до повного заряду і знаходиться в режимі очікування. Коли ж напруга в мережі відсутня або не відповідають нормі, включається резервна система і таким чином досягається безперебійне постачання споживачів електричною енергією. Єдине обмеження енергопостачання – місткість акумулятора, від чого залежить тривалість резервного живлення.

3.1 Структура ФЕС

У загальному випадку ФЕС (рис. 3.1) складається з системи фотоелектричних перетворювачів (СФЕП), системи наведення СФЕП на Сонце, контролера заряду акумуляторної батареї (АКБ), акумуляторних батарей, інвертора змінного струму і комутуючих пристроїв. До переваг СФЕП слід віднести: відносно невелику масу системи, простоту конструкції, надійність в роботі, задовільний ККД перетворення сонячної енергії в електричну і так далі.

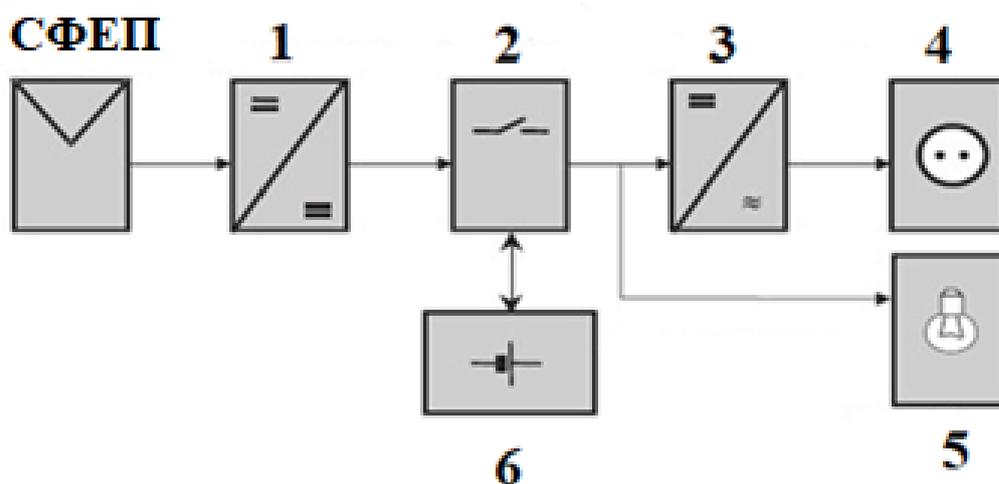


Рисунок 3.1 – Структурна схема суднової ФЕС:

1 – система відбору максимальної потужності, 2 – контроллер заряду/розряду, 3 – інвертор, 4 – споживачі змінного струму, 5 – споживачі постійного струму, 6 – акумулятор

ФЕС використовує акумуляторні батареї, але така система одночасно підключена до основної мережі. Якщо споживання електричної енергії перевищує ліміт потужності що надходить від СФЕП, то енергія береться з мережі рис 3.2 [26 – 27].

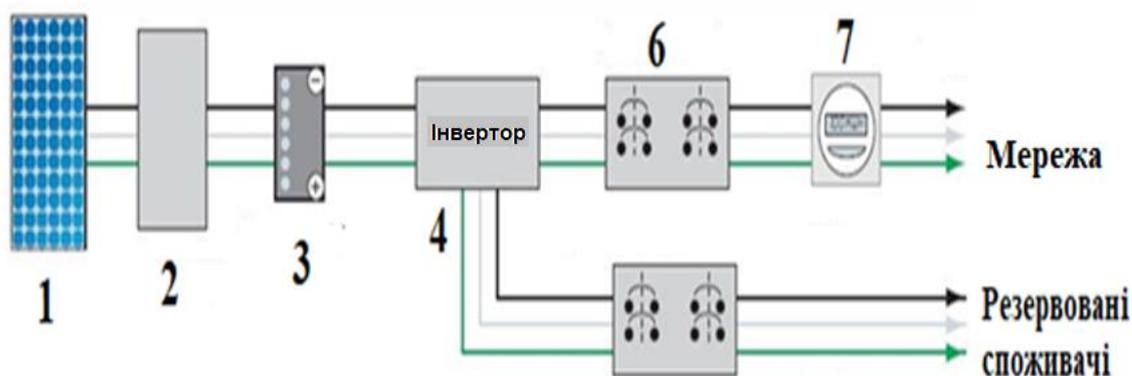


Рисунок 3.2 – Функціональна схема суднової ФЕС у складі ГЕС:

1 – СФЕП, 2 – контроллер заряду/розряду, 3 – акумулятор, 4 – інвертор, 5 – розподільний щит, 6 – вхід з мережі, 7 – лічильник.

3.2 Конфігурація ФЕС

Для складання конфігурації ГЕС необхідно визначити наступні параметри:

1. Кількість одночасно споживаної потужності в мережі.
2. Приблизний об'єм необхідної енергії у Вт·год в добу.
3. Розрахунок кількості задіяних СФЕП.
4. Розрахунок місткості акумуляторних батарей.
5. Місце розташування задіяного устаткування.

Розрахунок потужності полягає у статичному аналізі реального навантаження споживачами електроенергії. Використовуючи паспортні специфікації судна типу Ro-Ro місткістю 5200 юнітів, а саме: Аналіз електричного навантаження для радіонавігаційного обладнання (Electrical load analysis) в ходовому режимі судна визначено:

Кількість споживачів, $n=9$.

Потужність механізму, $P = 3,3$ кВт.

ККД $\eta = 0,6$.

Коефіцієнт потужності $0,8$.

Одинична встановлена потужність споживача, $P_c = 14$ кВт.

Коефіцієнт завантаження 1 .

Коефіцієнт одночасної роботи, $k = 0,95$.

Активна потужність у безперервному режимі, $P_c = 11,22$ кВт.

Реактивна потужність у безперервному режимі, $Q = 4,9$ кВар.

Сумарна потужність у безперервному режимі, $S = 12,22$ кВт.

Враховуючи коефіцієнт одночасної роботи.

$P_c = 10.65$ кВт, $Q = 4.65$ кВар, $S = 11.6$ кВт.

Для вибору конфігурації кількості елементів СФЕП необхідно знати кількість споживаної електроенергії в добу:

$$W = S \cdot t \quad (3.1)$$

де: S - сумарна споживана потужність з урахуванням коефіцієнта одночасної роботи, t - одиниця часу роботи споживачів.

$W = 11,6 \text{ кВт} \cdot 24 \text{ ч} = 278,4 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$ – сумарна затрата електроенергії в добу.

З урахуванням розрахованого значення сумарної затраченої енергії в добу і переліку споживачів вибираємо СФЕП продукції фірми Panasonic El.^oCo., Ltd. спільно з SANYO El., Co., Ltd Solar Division типу HIT-N220E01.

СФЕП такого типу можуть бути використані в ситуаціях недостатньої площі, оскільки мають на 27% більшу питому потужність, в порівнянні із звичайними СФЕП. ФЕП, що входять в СФЕП типу HIT-N220E01, менше реагують на підвищення температури, і в них менше механічної напруги. Втрата ККД на градус 0.3% замість 0.45% (с- Si). Тонші кремнієві ФЕП в порівнянні з традиційними монокристалічними с- Si ФЕП. У СФЕП типу HIT-N220E01 відмітною особливістю є нанесення на поверхню монокристалічного кремнію шару аморфного кремнію, за рахунок чого виникають потенційні ями для електронів і дірок, що призводить до значного зростання ККД СФЕП. На рис. 3.3, рис. 3.4 представлено ВАХ СФЕП типу HIT-N220E01 залежно від освітленості і температури робочої поверхні.

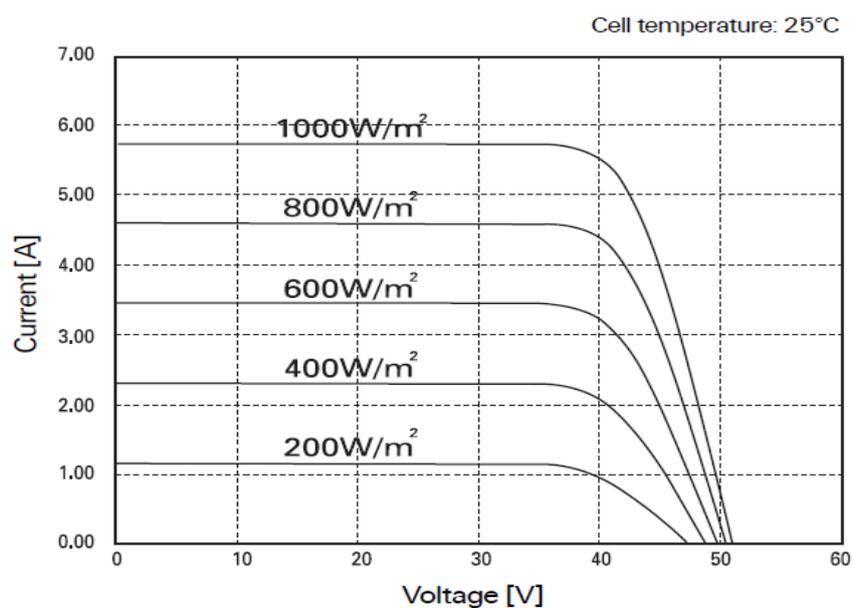


Рисунок 3.3 – ВАХ СФЕП типу HIT-N220E01 залежно від освітленості

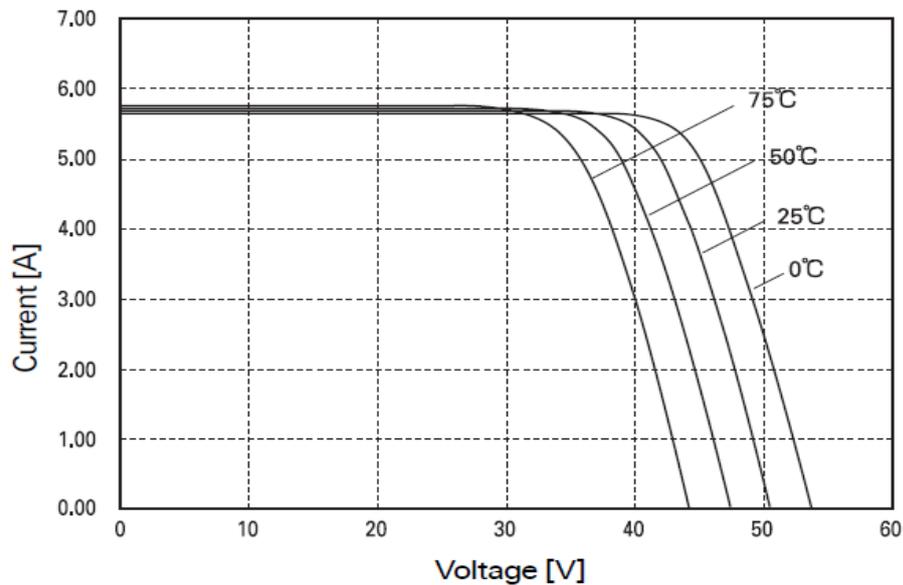


Рисунок 3.4 – ВАХ СФЕП типу HIT-N220E01 залежно від температури робочої поверхні

Продуктивність СФЕП визначається по формулі:

$$W_{\text{СФЕП}} = k \cdot P_W \cdot E \quad (3.2)$$

де: k – поправочний коефіцієнт відносно періоду року,

P_W – номінальна потужність СФЕП,

E – середній місячний рівень сонячної радіації.

За умови, що номінальна потужність СФЕП $P_W = 220$ Вт, поправочний коефіцієнт $k = 0,6$ а середній місячний рівень сонячної радіації E для субекваторіальних широт в період з 11/03/2017 по 09/04/2017 за даними метеорології NASA складає $6,15$ кВт/м²/день, продуктивність однієї одиниці СФЕП складе: $W_{\text{СФЕП}} = 811,8$ Вт·год [28].

Для визначення кількості одиниць СФЕП, потрібних для забезпечення достатньої потужності усієї ФЕС, скористаємося вираженням:

$$N = 1,2 \cdot \frac{W}{W_{\text{СФЕП}}} \quad (3.3)$$

З (3.3) виходить $N = 412$ шт. Враховуючи усю геометрію СФЕП загальна площа на судні складе 600 м². Виходячи з потрібної кількості СФЕП з урахуванням ергономіки розташування і вимог міжнародної конвенції по охороні людського життя на морі СОЛАС-74 оптимальне розташування СФЕП на верхній палубі судна

типу Ro-Ro з наступною основною розмірністю: довжина: 199,95 м, ширина: 32,20 м, висота: 34,2 м, осадка: 9,816 м, валова реєстрова місткість: 58939 тонн, дедвейт: 18836 тонн.

СФЕП, які входять в склад ФЕС загальною потужністю 90,64 кВт, розміщені на палубі судна. ФЕС виробляє електроенергію безперервно і незалежно від кількості електричної енергії, працює паралельно з судновою мережею, розподіляючи при цьому навантаження між споживачами і зарядкою акумуляторних батарей загального призначення і акумуляторних батарей радіо-навігаційного обладнання.

До складу ФЕС, структурна схема якої зображена на рис. 3.5, входять:

1. Керований випрямляч (КВ), який працює в режимі відстеження, підтримуючи тим самим напругу на шині постійного струму; системи фотоелектричних перетворювачів, що перетворюють сонячну енергію в електричну;

2. Лінійний регулятор напруги (РН1), принципова схема зображена на рис. 4.6, який підтримує напругу на шині постійного струму в заданій межі.

3. Акумуляторні батареї (АКБ), які знаходяться у буферному режимі і виступають в ролі резервного джерела електроенергії за умови переривання подання електроенергії від суднової мережі, під час недостатньої сонячної радіації або коли навантаження перевищує ліміт потужності, генерованої від СФЕП.

4. Контролер заряду АКБ відповідає за реалізацію алгоритму ефективного розряду/заряду, для певного типу акумулятора при даному хімічному складі компонентів, компенсацію різниць потоків енергії при постачанні споживача енергією одночасно із зарядкою акумулятора (у випадки зарядки акумулятора при роботі на навантаження).

5. Прямий перетворювач постійного струму (DC/DC), який незалежно від способу подання електричної енергії в мережу, забезпечує постійну напругу на навантаженні.

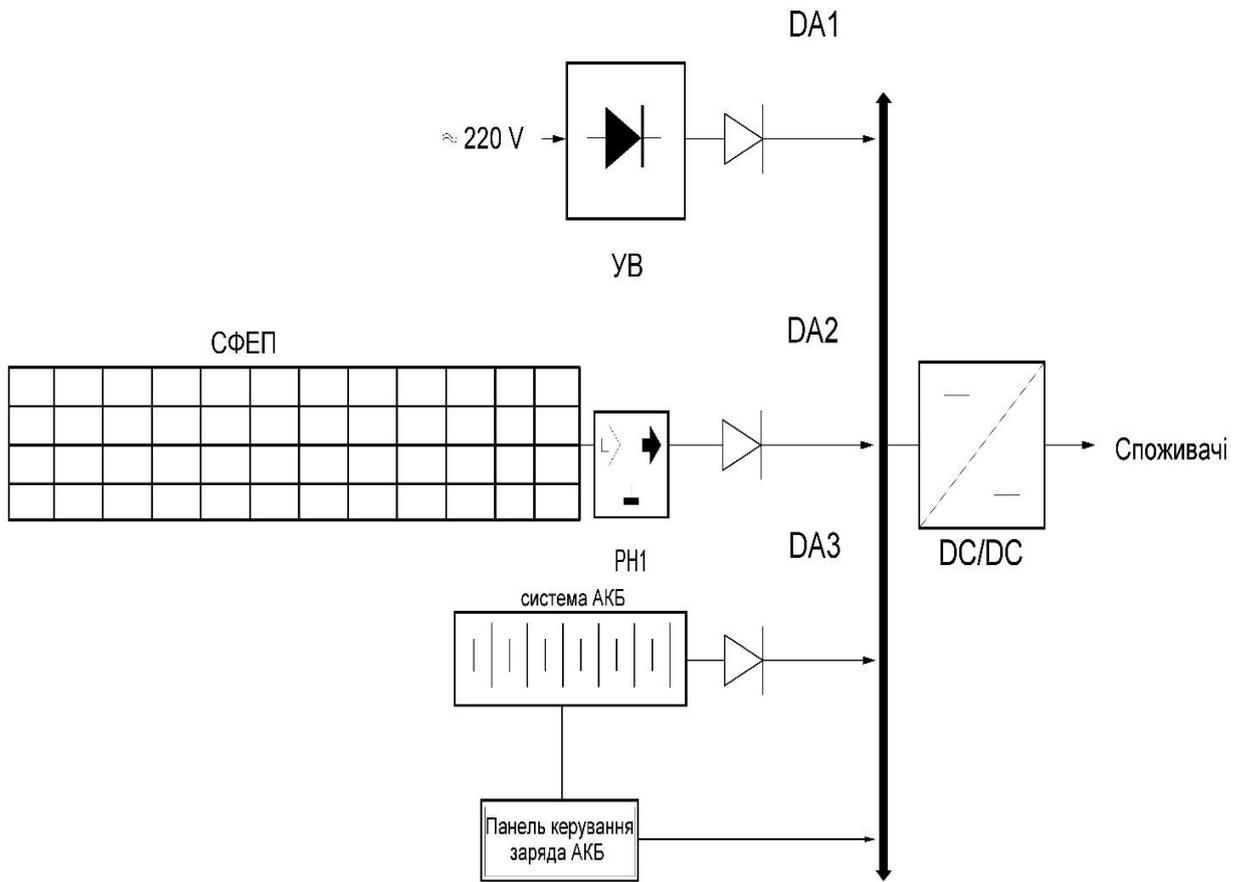


Рисунок 3.5 – Структурна схема ФЕС

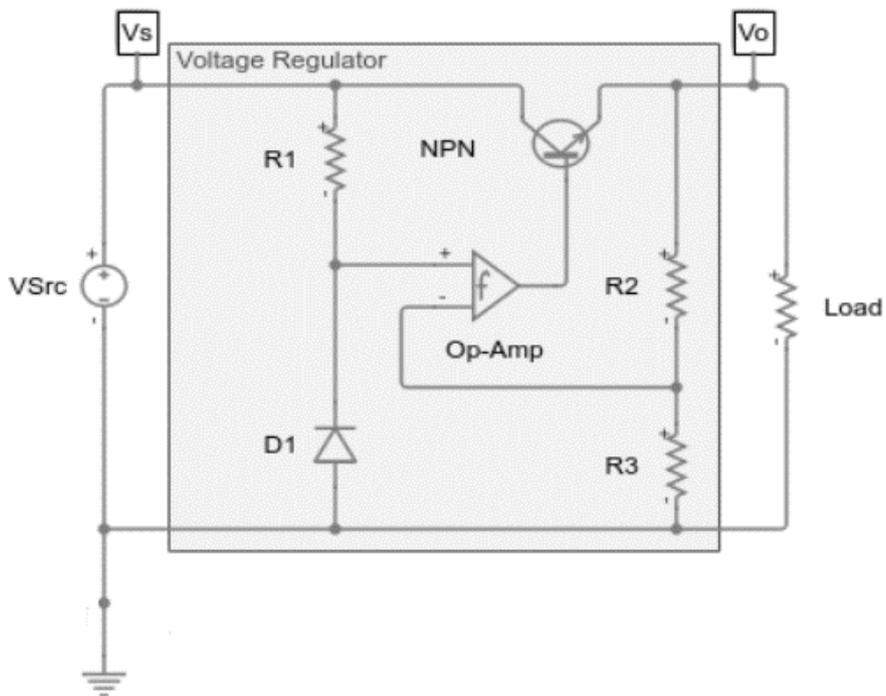


Рисунок 3.6 – Принциповаа схема лінійного регулятора напруги

Опис основних блоків алгоритму :

- Sn – початок роботи;
- P1 – Контроль напруги на виході КВ ($26,6 \text{ В} < U_{\text{DCBUS}} < 30 \text{ В}?$);
- P2 – Перевірка нижнього порогового значення напруги на виході КВ ($U_{\text{DCBUS}} < 26,6 \text{ В}?$);
- P3 – Перевірка верхнього порогового значення напруги на виході КВ ($U_{\text{DCBUS}} > 30 \text{ В}?$);
- A4 – Корекція напруги (підвищення);
- A5 – Корекція напруги (пониження);
- A6 – Розрахунок параметрів СФЕП з урахуванням чинників довкілля;
- P7 – Контроль напруги на виході СФЕП ($26,6 \text{ В} < U_{\text{DCBUS}} < 30 \text{ В}?$);
- P8 – Перевірка верхнього порогового значення напруги на виході АКБ ($U_{\text{АКБ}} > 26,6 \text{ В}?$);
- A9 – Розрахунок струму заряду АКБ ($I_{\text{зар}} = I_{\text{C}} - I_{\text{роз}}$);
- A10 – Робота АКБ у буферному режимі ($I_{\text{C}} = I_{\text{зар}}$);
- P11 – Перевірка номінального струму АКБ ($I_{\text{АКБ}} = 25 \text{ А}$);
- A12 – Підключення АКБ в якості резервного джерела електричної енергії;
- P13 – Перевірка нижнього порогового значення напруги на виході АКБ ($U_{\text{АКБ}} < 21 \text{ В}?$);
- A14 – Аварійно-попереджувальна сигналізація про непрацездатність АКБ;
- A15 - Розрахунок роботи DC/DC перетворювача;
- Sk – кінець алгоритму.

3.4 Комп'ютерне моделювання і дослідження системи фотоелектричних перетворювачів

Моделювання СФЕП робиться за допомогою пакету програм MATLAB/Simulink. Пакет MATLAB є високорівневою технічною обчислювальною мовою і інтерактивним середовищем для розробки алгоритмів, візуалізації і аналізу цих, числових розрахунків. Використовуючи пакет MATLAB,

можна вирішувати технічні обчислювальні завдання набагато швидше, ніж за допомогою традиційних мов програмування, таких як C, C++ і Fortran. – MathWorks, Inc .

MATLAB – пакет програм для виконання широкого кола математичних завдань. Пакет містить сотні команд для роботи в області математики. Це високорівнева мова програмування, яка здатна взаємодіяти з іншими мовами програмування, наприклад, Fortran і C. Крім того, існує можливість використати пакету MATLAB для об'єднання математичних обчислень з текстом і графікою з метою створення досконалих, інтегрованих, інтерактивних документів.

Комп'ютерна модель СФЕП складається з набору ФЕП приведена на рис. 3.8. ФЕП є джерелом струму. Модель сонячних елементів включає наступні компоненти: сонячно-індукований струм; температурна залежність; тепловий порт.

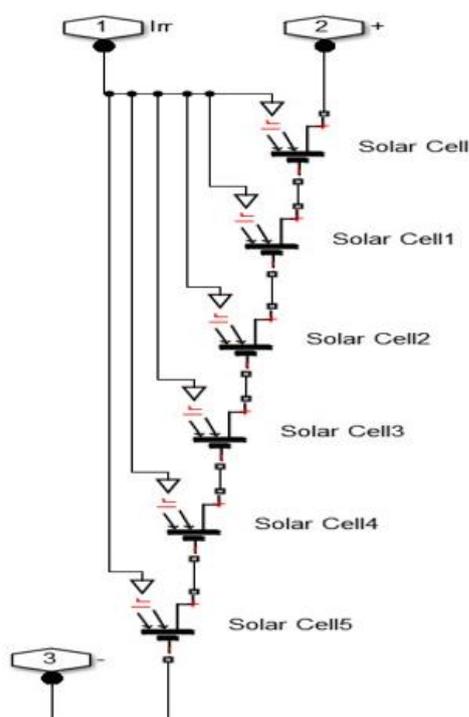


Рисунок 3.8 – Послідовне з'єднання ФЕП в комп'ютерній моделі

Комп'ютерна модель на рис 3.8 дозволяє вибирати між двома видами ФЕП: 8-параметричний вид і 5-параметричний вид (рис. 3.9). 5-параметричний вид можна представити струмом короткого замикання і напругою розімкненого

контуру, можна змоделювати будь-яку кількість ФЕП підключених послідовно, використовуючи один блок, встановивши параметр (Number of series cells) значення більше одиниці. Тим самим імітується рівняння для одного ФЕП, але масштабується вихідна напруга відповідно до кількості вказаних ФЕП. Це призводить до ефективнішого моделювання, ніж якби рівняння для кожного ФЕП моделювалися індивідуально.

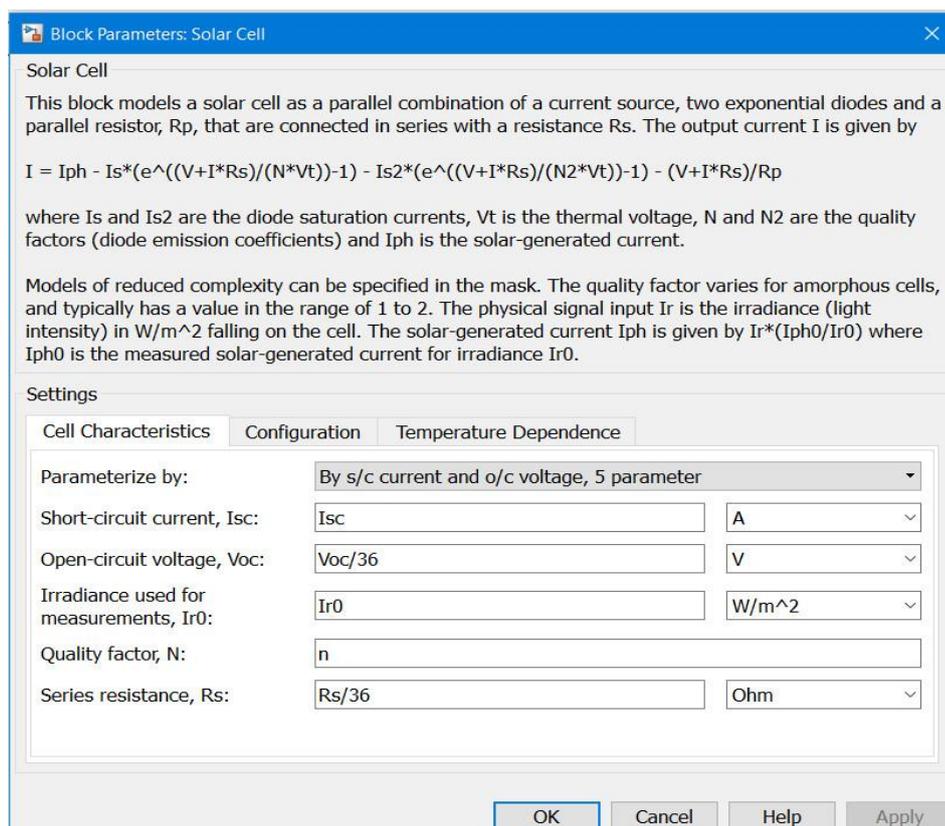


Рисунок 3.9 – Блок налаштування параметрів ФЕП

Для приведення ВАХ необхідної СФЕП розроблена модель, яка зображена на рис. 3.10. Модель дозволяє отримати ВАХ і характеристику навантаження досліджуваної СФЕП рис. 3.11, рис. 3.12 [27].

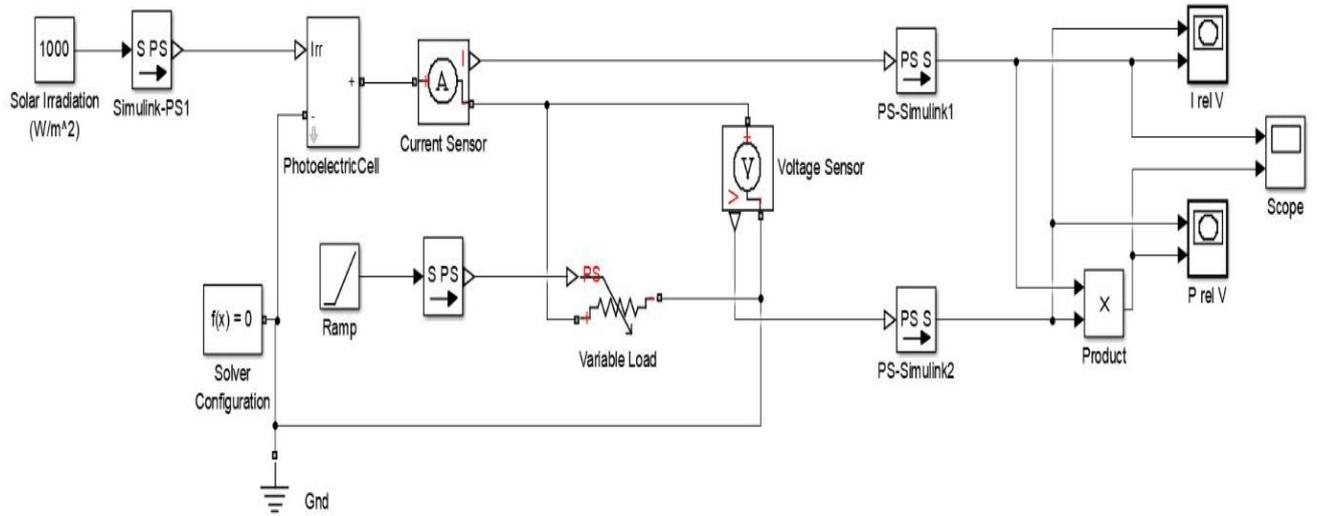


Рисунок 3.10 – Схема комп'ютерної моделі

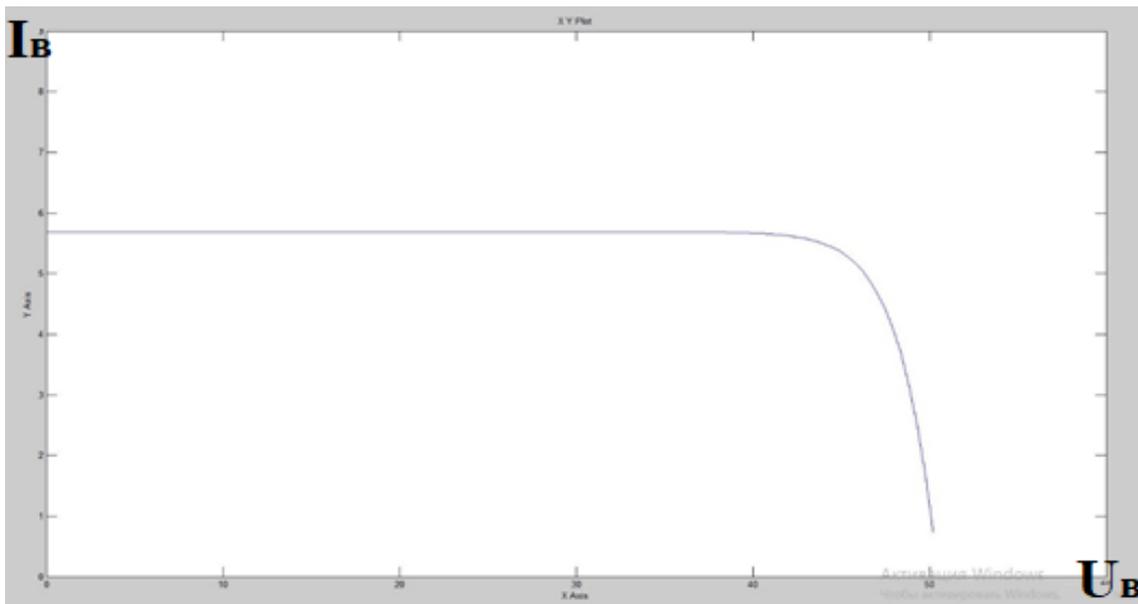


Рисунок 3.11 – ВАХ СФЕП типу НІТ-N220Е01

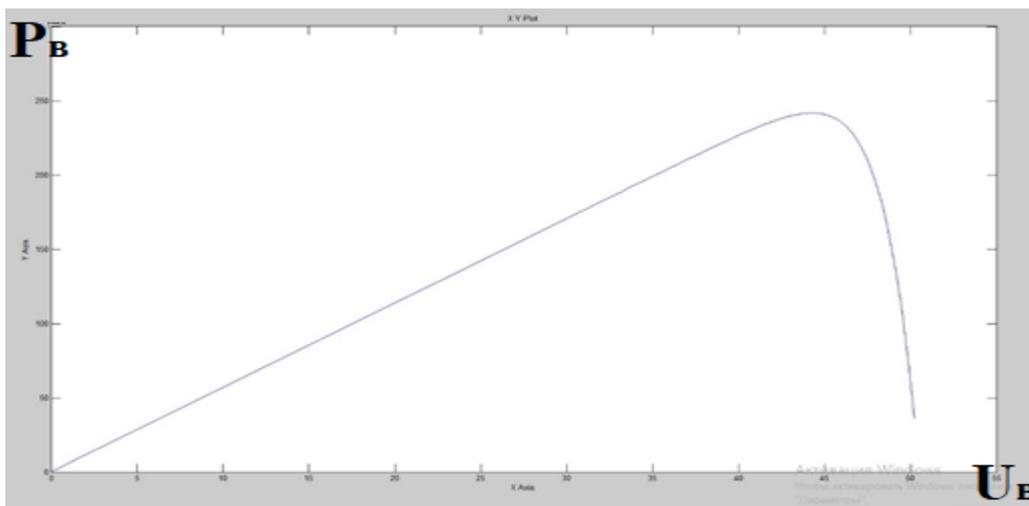


Рисунок 3.12 – Характеристика навантаження СФЕП типу HIT-N220E01

Параметри СФЕП отримані за стандартних тестових умов (STC), які відбивають роботу СФЕП в ідеальних умовах, які зазвичай досягаються в заводських або лабораторних умовах. При цьому освітленість має бути 1000 Вт/м^2 , температура СФЕП $25 \text{ }^\circ\text{C}$, спектр випромінювання повинен відповідати масі повітря AM1.5, а швидкість вітру має дорівнювати нулю. Умови STC рідко зустрічаються при реальній експлуатації СФЕП.

Розташування пропонованої ФЕС на розглядаємому судні типа Ro-Ro наведено у додатку Б.

Альтернативне рішення експериментальної розробки ФЕС у складі суднової ГЕС, пов'язане з використанням систем ФЕП, розглядається у розділі 4.

Висновки до розділу 3:

1. На основі розрахунків розрахунок потужності та кількості одиниць фотоелектричних перетворювачів розроблена комп'ютерна модель, що дозволила отримати їх вольт-амперні характеристики.
2. Розроблений алгоритм роботи схеми управління процесами у фотоелектричній станції, яка входить до складу гібридної електростанції судна типу Ro-Ro у якості резервного джерела електропостачання.

4 СКЛАД ТА СТРУКТУРА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ СУДНОВОЇ ГІБРИДНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

4.1 Мета створення експериментальної установки

Одним із ключових викликів сучасної морської енергетики є підвищення рівня енергетичної автономії суден при одночасному зниженні залежності від традиційних дизельних електростанцій. Створення експериментальної гібридної електроенергетичної станції на судні RO-RO має на меті детальне дослідження ефективності впровадження сонячних панелей, акумуляторних систем та інверторного обладнання в умовах постійних змін положення судна, хвилювих навантажень, впливу вітру та агресивної морської корозії. Схема ФЕС, яка пропонується для застосування у складі ГЕС, наведена на рис. 4.1.

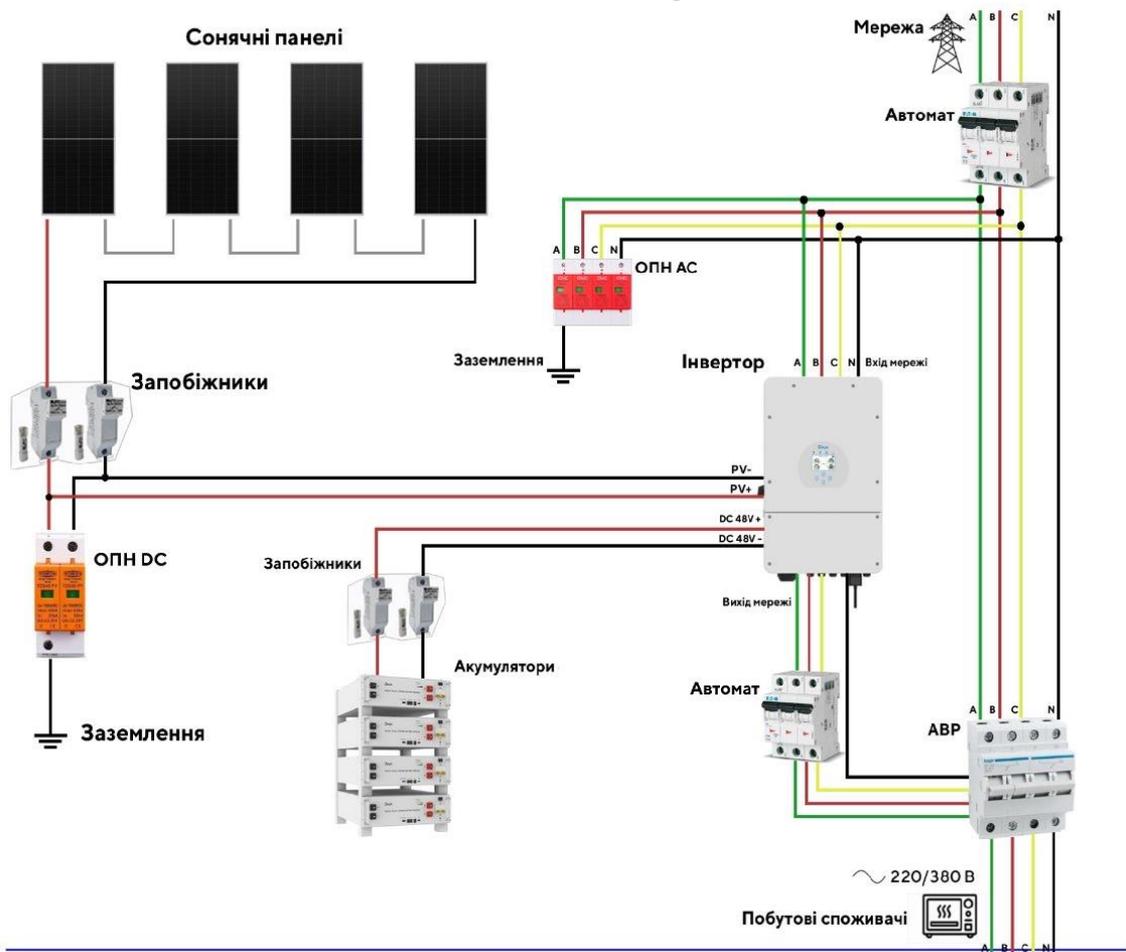


Рисунок 4.1 – Схема установки, яка пропонується для застосування у складі ГЕС

ФЕС включає наступні компоненти:

- Фотоелектричні панелі, розміщені на судні з урахуванням оптимального захоплення сонячного випромінювання.
- Високовольтна літій-залізо-фосфатна акумуляторна батарея, що забезпечує зберігання надлишкової енергії.
- Гібридний інвертор, який координує роботу системи, перетворюючи постійний струм у змінний та управляючи потоками енергії між панелями, батареєю і дизель-генератором.
- Резервний дизель-генератор, що включається автоматично у разі недостатньої виробітку або заряду батареї.

Основною метою є аналіз режимів взаємодії між елементами системи та оптимізація енергетичних процесів у змішаних режимах роботи. Зокрема дослідження поєднання живлення суднових споживачів від сонячних панелей, акумуляторів та дизель-генератора в різних експлуатаційних умовах.

Для досягнення оптимальних результатів експериментальна установка базується на сучасних технологіях і обладнанні, зокрема високоефективних LiFePO₄ батареях, гібридних інверторах з підтримкою інтелектуального управління, а також корозійностійких матеріалах панелей і кріплень, адаптованих до морського середовища. Ознайомлення з такими передовими рішеннями дозволяє краще зрозуміти можливості та обмеження гібридних систем у морському транспорті, забезпечити підвищення надійності, енергоефективності та екологічності суднових енергокомплексів.

Таким чином, створення й дослідження цієї експериментальної установки спрямоване на комплексне вирішення актуальних задач суднової енергетики та відкриває шлях до впровадження інноваційних енергетичних рішень у морській індустрії.

4.2 Структура експериментальної установки

Експериментальна ФЕС складається з фотоелектричного масиву, інверторної системи, акумуляторного блоку та інтегрованого суднового дизель-генератора.

1. Фотоелектричні панелі LP 585-M/MD змонтовані на верхній палубі що забезпечує мінімізацію тіньових втрат та підвищення ефективності збору енергії при різних курсах судна.

Сонячні панелі (СФЕП) — це пристрої, які перетворюють сонячне світло у електроенергію. Основні типи сонячних панелей, які сьогодні широко використовуються, це монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові. Кожен тип має свої особливості та переваги.

Основні типи сонячних панелей:

Монокристалічні панелі — виготовлені з одного кристала кремнію, мають найвищу ефективність (до 22%), чорний або темно-синій колір. Вони добре працюють навіть при слабкому освітленні і мають тривалий термін служби. Це найпопулярніший варіант для побутових та комерційних систем, але вони найвищої вартості.

Полікристалічні панелі — виготовлені з розплавлених шматочків кремнію, мають трохи нижчий ККД (приблизно 15-17%) і синій відтінок. Вони дешевші у виробництві, але більш чутливі до впливу температури.

Тонкоплівкові панелі — зроблені зі шарів кремнію або інших матеріалів (наприклад, кадмій, телур, графен). Вони мають низький ККД (9-13%), але дуже легкі і гнучкі, підходять для нестандартних поверхонь. Термін служби менший, ніж у кристалічних панелей, але вони дешевші.

Сучасні технології та інновації:

Технологія PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) покращує ККД монокристалічних панелей за рахунок додаткового пасивуючого шару, що підвищує збирання світла навіть у нестабільних погодних умовах.

Біфасціальні (двосторонні) панелі дозволяють збирати сонячне світло з двох сторін, що може підвищити вироблення енергії на 20-30% порівняно з традиційними панелями.

Існують інновації у покриттях, наприклад TSRD (Transparent Smart Radiation Device) — прозоре інтелектуальне покриття, що регулює теплове випромінювання, знижуючи перегрів та підвищуючи термін служби панелей, навіть для космічних апаратів.

Технології у виробництві фотоелементів, такі як Shingled Cells, Multi Busbar, Split panels та IBC (Interdigitated Back Contact) підвищують довговічність і ефективність панелей за рахунок зменшення електричних втрат та кращого поглинання світла.

Сучасний ринок ФЕП пропонує вибір з багатьох моделей, включаючи потужні монокристалічні панелі Longi Solar, Logic Power, Jinko Solar Tiger Neo, Trina Solar Vertex та інші, які демонструють високі показники надійності і ефективності.

Таким чином, ФЕП постійно еволюціонують, зростає їх ефективність і надійність завдяки новим технологіям і матеріалам, роблячи їх більш доступними і привабливими для широкого використання.

2. Інвертор SUN-30K-SG01HP3-EU-VM4 виконує перетворення енергії та керує взаємодією між джерелами.

Гібридні сонячні інвертори — це спеціальні пристрої, які поєднують у собі функції звичайного інвертора разом із можливістю підключення акумуляторних батарей для зберігання надлишкової сонячної енергії. Вони перетворюють постійний струм (DC), який генерується сонячними панелями, у змінний струм (AC) для живлення побутових чи офісних пристроїв. Водночас гібридні інвертори здатні заряджати акумулятори з надлишкової енергії і використовувати цю накопичену енергію в ті періоди, коли сонця немає або його недостатньо (вночі, похмуро).

Основні властивості гібридних інверторів наступні. Вони забезпечують автономність живлення: під час відключення електроживлення, прилади можуть працювати на енергії, накопиченій у батареях (рис. 4.2).

Гібридні інвертори можуть автоматично перемикатися між живленням від сонячних панелей та акумуляторів, залежно від доступності енергії.

Вони дозволяють надійно контролювати та управляти використанням енергії, адже весь потік електроенергії проходить через один пристрій, що дає можливість відслідковувати виробництво, споживання і збереження.

Переваги гібридних сонячних інверторів

Висока гнучкість і надійність електроживлення.

Ефективне використання сонячної енергії.

Можливість використання енергії в автономному режимі без мережі.

Просте управління та моніторинг в одному пристрої.

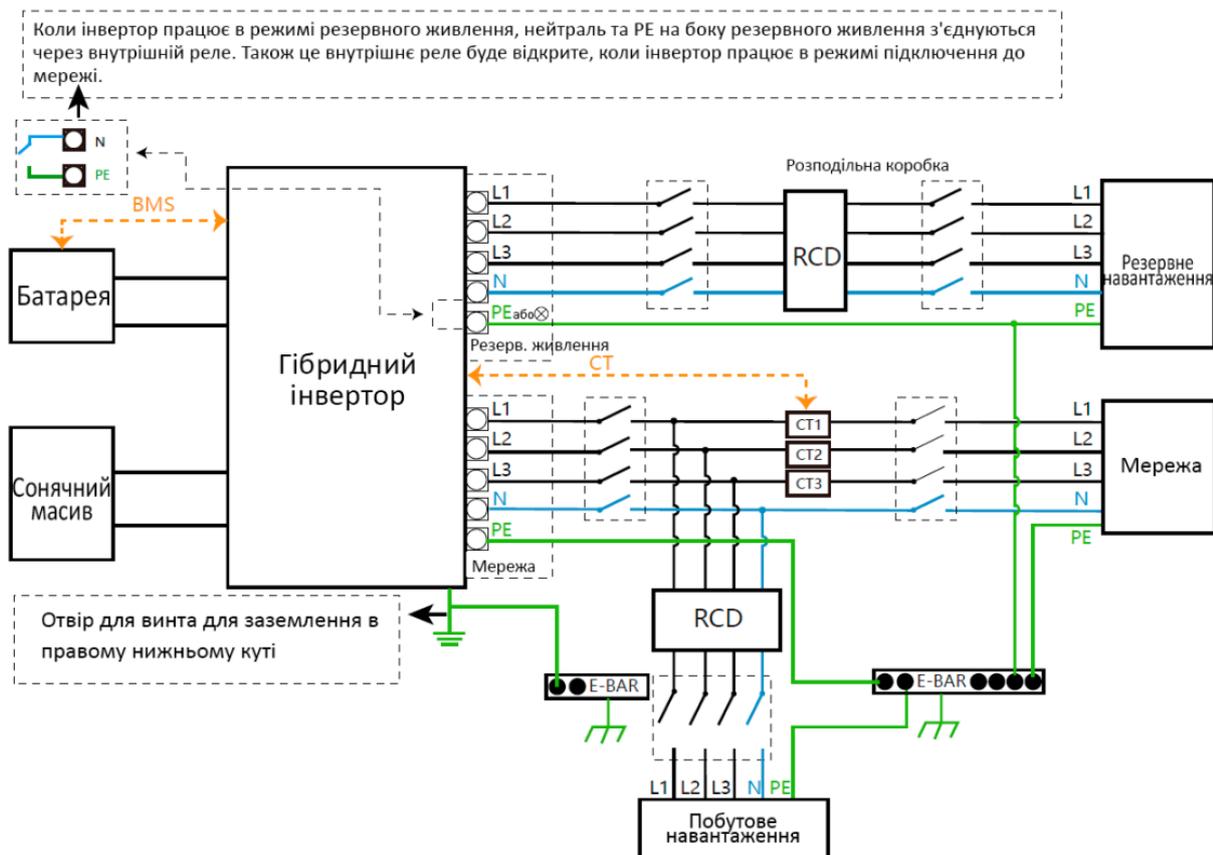


Рисунок 4.2 – Схема підключення інвертора

Гібридні інвертори є ключовими компонентами сучасних ФЕС, особливо коли важлива безперервність живлення і підвищена ефективність використання відновлюваної енергії. Вони широко використовуються в автономних мережах, де важливо накопичувати електроенергію для подальшого використання. Таким чином, гібридний інвертор не тільки перетворює енергію сонця у корисний змінний струм, а й управляє збереженням та розподілом електричної енергії, підвищуючи автономність і ефективність електроенергетичних систем.

3. Акумуляторний блок LP LiFePO₄ Battery HVM 665,6V 280Ah забезпечує накопичення енергії та вирівнювання навантажень.

Високовольтні літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) акумулятори — це сучасний тип літій-іонних батарей, які використовують катод із фосфату заліза-літію. Вони відомі своєю високою безпекою, стабільністю та тривалим терміном служби, що робить їх популярними для застосувань у системах збереження енергії, відновлюваних джерелах, електромобілях та резервному живленні.

Характеристики та особливості:

Робоча напруга високовольтних пакунків LiFePO₄ може сягати 400–500 В і більше, що дозволяє забезпечувати велику енергоємність і більш ефективне живлення при меншій кількості паралельних з'єднань.

Високий ресурс — до 7000 циклів заряд-розряд при глибині розряду 80%, що значно перевищує традиційні свинцево-кислотні акумулятори. Вони при цьому зберігають здатність швидкої зарядки і розряду навіть при великих струмах.

Відсутність ефекту пам'яті і низький саморозряд (1-3% на місяць), що дуже важливо для зберігання енергії у довготривалих циклах.

Відмінна термічна стабільність і хімічна безпека, що робить їх менш схильними до перегріву, займання або вибухів у порівнянні з іншими літій-іонними батареями. Температурний діапазон роботи від приблизно -20°C до +60°C і навіть вище у деяких моделях.

Екологічність завдяки відсутності токсичних компонентів, часто використовуваних в інших літій-іонних технологіях (кобальт, кадмій), що робить такі акумулятори більш дружніми до навколишнього середовища.

Високовольтні LiFePO₄ акумулятори широко використовують у ФЕС для накопичення енергії. Висока напруга дозволяє підключати модулі гнучко і оптимізує енергоспоживання інверторів. Високовольтні літій-залізо-фосфатні акумулятори поєднують у собі безпечність, високу енергоємність і тривалий ресурс роботи. Вони є особливо ефективними для застосування у промислових та побутових системах накопичення відновлюваної енергії, забезпечуючи стабільність, екологічність і довговічність роботи.

4.3 Огляд основних компонентів експериментальної суднової ФЕС

4.3.1 Фотоелектричний модуль LP 585-M/MD

Основні характеристики фотоелектричного модуля LP 585-M/MD наведені у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Основні характеристики фотоелектричного модуля LP 585-M/MD

Модель	LP 585-M/MD		
Розміри (Д/Ш/В)	2278*1134*30		
	STC		NOCT
Потужність модуля при STC (P _{max}), Вт	585		441
Максимальна напруга (V _{mp}), В	42.52		39.90
Максимальний струм (I _{mp}), А	13.76		11.06
Напруга холостого ходу (V _{oc}), В	51.16±3%		48.59±3%
Струм короткого замикання (I _{sc}), А	14.55±3%		11.77±3%
Коефіцієнт ефективності модуля (%)		22.64	

4.3.2 Трифазний інвертор SUN-30K-SG01HP3-EU-BM4

Основні характеристики трифазного інвертора SUN-30K-SG01HP3-EU-BM4 наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Технічні параметри гібридного інвертора

Вхідні дані батареї	
Тип батареї	Літій-іонна
Діапазон напруги батареї, В	160-800
Макс. струм заряду, А	0+50
Макс. струм розряду, А	0+50
Кількість входів для батареї	2
Стратегія заряду для літій-іонної батареї	Самоадаптація до BMS
Вхідні дані ланцюга фотомодулів	
Макс. вхідна потужність пост. струму (DC), Вт	39000
Макс. вхідна напруга пост. струму (DC), В	1000
Напруга запуску, В	180
Діапазон напруги MPPT, В	150-850
Діапазон напруги при повному навантаженні, В	360-850
Номінальна вхідна напруга пост. струму, В	600
Вхідний струм фотомодулів, А	36+36+36
Макс. струм короткого замикання, А	55+55+55
Кількість MPPT	3
Кількість MPPT на кожний ланцюг	2+2+2
Вихідні дані змін. струму (AC)	
Номінальна вихідна потужність змін. струму, Вт	30000
Макс. вхідна/вихідна потужність змін. струму, Вт	33000
Номінальний вихідний струм AC, А	45,5/43,5
Макс. вихідний струм AC, А	50/47,8
Макс. незбалансований трифазний вихідний струм, А	60
Макс. постійний прохідний струм AC, А	200
Пікова потужність (автономний режим), Вт	В 1,5 рази більша від номінальної, 10 с
Вхідний струм генератора/розумного навантаження/підключення AC, А	45,5/200/45,5
Коефіцієнт потужності	Від 0,8 (випереджуючий) до 0,8 (відстаючий)
Номінальна вхідна/вихідна напруга/Діапазон, В	220/380, 230/400 0,85Un-1,1Un
Вихідна частота і напруга	50/60 Гц; 3L/N/PE 220/380, 230/400 В змін. струму
Тип мережі	Трифазна

Загальне гармонічне спотворення (THD)	<3% (від номінальної потужності)
Постійна складова в мережі	<0,5% від номінального струму

4.3.3 Високовольтний акумуляторний блок LP LiFePO4 Battery HVM 665,6V 280Ah

Основні характеристики високовольтного акумуляторного блоку LP LiFePO4 Battery HVM 665,6V 280Ah наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Основні характеристики високовольтного акумуляторного блоку LP LiFePO4 Battery HVM 665,6V 280Ah

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАРЯДУ	
Рекомендований струм заряду, А	140
Максимальний струм заряду, А	160
Напруга повного заряду, V	759,2
Напруга заряду буферний режим, V	707,2
Повторне підключення напруги заряду, V	728
ХАРАКТЕРИСТИКИ РОЗРЯДУ	
Рекомендований струм розряду, А	140
Максимальний струм розряду, А	160
Рекомендована низька напруга відключення, V	582,4
Мінімальна напруга, V	561,6
Повторне підключення напруги, V	644,8
ТЕМПЕРАТУРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Температура розряду, °C	-20 ~ +60
Температура заряду, °C	0 ~ +40
Температура зберігання, °C	-20 ~ +40
ЕЛЕКТРИЧНА СПЕЦИФІКАЦІЯ	
Номінальна напруга, V	665,6
Номінальна ємність, Ah	280
Саморазряд, %/міс.	<3%
Енергія, Wh	186368
BMS	Високовольтна 160A

4.3.4 Аварійний генератор Месс Alte ECO 38·3SN/4

Аварійний генератор Месс Alte ECO 38·3SN/4 — це трьохфазний синхронний безщітковий генератор змінного струму, широко використовуваний у стаціонарних електростанціях, зокрема й у судновій енергетиці. Він відомий своєю надійністю, високим коефіцієнтом корисної дії та стабільністю вихідних параметрів. У таблиці 4.4 наведені ключові технічні характеристики цього генератора у вигляді таблиці для більш зручного ознайомлення.

Таблиця 4.4 – Технічні характеристики аварійного генератора Месс Alte ECO 38·3SN/4

Характеристика	Значення
Виробник	Месс Alte
Потужність постійна	180 кВт (225 кВА)
Потужність резервна	198 кВт (247.5 кВА)
Напруга вихідна	380/400 В
Частота	50 Гц
Кількість фаз	3
Частота обертання ротора	1500 об/хв
Тип ротора	Короткозамкнутий, безщітковий
Система збудження	Бесщіткова з автоматичним регулюванням напруги (АРН) типу SHUNT
Клас електрозахисту	IP21 (можливий більш високий за замовленням)
Клас ізоляції обмоток	H
Кількість підшипників	1
Розміри (Д x Ш x В)	821 x 584 x 827 мм
Вага	590 кг
Коефіцієнт корисної дії	Близько 93%
Особливості	Високий пусковий струм (>300%), захист від електромагнітних перешкод відповідно до стандартів VDE, EN61000-6-3, EN61000-6-2, наявність цифрового регулятора напруги DSR, можливість оснащення системою PMG3
Відповідність стандартам	ISO 9001, CEI 2-3, IEC 34-1, EN 60034-1, VDE 0530, BS 4999-5000,

	NF 51.111, CAN/CSA-C22.2, NEMA MG 1-2011, ISO 8528-3
Вентиляція	Примусова, охолодження за допомогою вентилятора
Матеріали корпусу	Сталь, чавун, високоякісна ізоляція обмоток
Додаткові опції	Різні класи захисту (IP23, IP43, IP45), аксесуари для моніторингу температури та надмірної напруги, антиконденсаційні підігрівачі

Розглядаєма модель генератора Mess Alte ECO 38·3SN/4 здатна забезпечити стабільну роботу суднової електростанції, витримати складні умови морської експлуатації, має захист від перевантажень і автоматизовану систему контролю для довготривалої та безперебійної роботи.

Таким чином, Mess Alte ECO 38·3SN/4 – це високонадійний промисловий генератор з чудовими технічними параметрами, оптимальний для застосування в морських системах автономного живлення, забезпечуючи потужність, надійність і відповідність міжнародним стандартам якості та безпеки [29–32].

Усі ключові компоненти гібридної електростанції на судні типу Ro-Ro мають власні специфічні технологічні особливості, спрямовані на забезпечення максимальної ефективності роботи у складних умовах морського середовища, де агресивна дія вологи, солей і постійних вібрацій вимагає не лише надійності, а й інновацій у підходах до конструкції й вибору матеріалів [33].

Фотоелектричні модулі, встановлені на верхній палубі, виготовлені за half-cell технологією, що передбачає поділ кожного стандартного фотомодуля на дві симетричні частини. Такий конструктив дозволяє значно зменшити втрати потужності в разі локального затінення чи пошкодження окремої ділянки панелі, а також підвищує коефіцієнт заповнення і загальну енергетичну віддачу. Додатково, застосування нанотехнологічних покриттів дає змогу утримувати поверхню модулів максимально чистою, що вкрай актуально для палубної установки, адже це сприяє стабільно високій ефективності генерації навіть за умов постійної дії морського бризу та пилу [33].

Інвертор, інтегрований у систему, підтримує чотири незалежні максимальні точки відстеження потужності (MPPT), що дозволяє оптимально працювати з групами фотомодулів, поєднаних у різних секціях палуби під різними кутами чи з різною орієнтацією. Високий коефіцієнт корисної дії інвертора є результатом використання сучасної силової електроніки, системи адаптивного управління та вдосконаленої топології перетворювачів. Це важливо для забезпечення мінімальних втрат під час перетворення й передачі електроенергії до корабельної електромережі, особливо, коли йдеться про покриття змінних навантажень та пікових споживань у ході рейсу [33].

Акумуляторна система обов'язково повинна гарантувати високий ресурс циклів та надійність у тривалому автономному режимі роботи судна. Для цього застосовуються літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) батареї, що вирізняються не лише розширеним температурним діапазоном безпечної експлуатації, але й низькою деградацією при повторному заряджанні-розряджанні. Рівень інтеграції системи управління батареями (BMS) дозволяє відслідковувати кожний елемент акумулятора окремо, своєчасно реагуючи на будь-які відхилення температури чи напруги.

Усі вищезазвані рішення гармонійно поєднані й орієнтовані не лише на енергоефективність кожного окремого пристрою, а й усієї суднової електроенергетичної системи в цілому, враховуючи багатofакторність впливу й необхідність динамічного балансування навантаження, автоматизованого захисту та резервування [33].

4.4 Принцип роботи суднової гібридної електричної станції

Принцип роботи суднової гібридної системи базується на інтеграції різних джерел енергопостачання — сонячних панелей, акумуляторних батарей та ДЕС, що забезпечує безперервність і оптимальне використання електричної енергії.

Робота проектуємої суднової ГЕС складається з роботи наступних її елементів:

1. Генерація енергії: сонячні панелі (ФЕС) перетворюють сонячне випромінювання у постійний електричний струм (DC).

2. Гібридний інвертор перетворює постійний струм від ФЕС і акумуляторів на змінний струм (AC), який потрібен для живлення споживачів.

3. Надлишкова енергія, яка не споживається відразу, накопичується у високовольтних літій-залізо-фосфатних (LiFePO₄) акумуляторах. Це дозволяє забезпечити споживачів електричною енергією вночі або в похмуру погоду.

4. Система автоматично координує потоки електроенергії. Вона визначає пріоритети: спочатку постачання від системи ФЕС, потім з акумулятора, і лише за потреби використання мережі.

5. Коли акумулятори заряджені, зайва енергія може бути направлена назад у мережу або обмежена. При відсутності сонячного світла або повному розряді батарей система плавно перемикається на мережеве живлення, забезпечуючи безперервність енергопостачання.

Переваги та ефективність застосування ФЕС у складі суднової ГЕС:

Зниження залежності від електромережі за рахунок автономного накопичення і використання власної електроенергії.

Безперервність живлення з можливістю роботи в автономному режимі.

Захист від перевантажень та перенапруг через інтегровані системи управління та захисту.

Оптимізація енергоспоживання за допомогою програмованих режимів роботи інвертора і управління акумуляторними батареями.

Пропонуються наступні режими роботи суднової ФЕС.

1. Режим самозабезпечення. У цьому режимі вся вироблена сонячними панелями енергія безпосередньо живить споживачів, а надлишок заряджає акумулятори. Використання основної електромережі мінімальне або відсутнє.

2. Режим автономної роботи. При відсутності сонячного світла (вночі або у похмуру погоду) система використовує накопичену в акумуляторах енергію для живлення споживачів, забезпечуючи безперервність енергопостачання без підключення до основної мережі.

3. Режим резервного живлення (аварійний режим). Якщо акумулятори розряджені або потужності сонячних панелей недостатньо, система автоматично підключається до зовнішньої електромережі, забезпечуючи стабільне живлення без перебоїв.

Особливості суднових ГЕС полягають у наступному. Суднові ГЕС, адаптовані для морського середовища, враховують підвищені вимоги до корозійної стійкості та запобігання вібраціям і ударним навантаженням, що забезпечує стабільність роботи в суворих умовах. Таким чином, гібридна система працює як розумний балансувальний механізм між генерацією, збереженням і споживанням електроенергії, оптимізуючи її використання та забезпечуючи надійність і ефективність навіть у складних умовах експлуатації.

4.5 Особливості монтажу, експлуатації та безпеки суднових ГЕС

Монтаж сонячних панелей в агресивному морському середовищі слід виконувати з урахуванням особливостей експлуатації на морських суднах. Для забезпечення довговічності та надійності системи треба обирати матеріали з високою корозійною стійкістю — каркаси та кріплення з морської нержавіючої сталі (А4) та анодованого алюмінію. Металеві елементи необхідно ізолювати один від одного для запобігання гальванічній корозії, а всі місця кріплення — герметизувати силіконовими ущільнювачами.

Монтаж сонячних панелей необхідно здійснювати із застосуванням антикорозійних болтів та гаек, оснащених спеціальними шайбами для ущільнення. Панелі треба встановлювати з оптимальним нахилом і орієнтацією для максимального збору сонячної енергії з мінімальним затіненням від конструкцій судна. Система кріплення виконується з урахуванням вітрових, вібраційних навантажень і руху судна, забезпечуючи надійність фіксації.

Кабелі для підключення обираються з подвійною ізоляцією, є стійкими до дії ультрафіолету та солоної морської води. Контакти та вводи кабелів герметизовані

спеціальними захисними матеріалами. Для захисту від електричних розрядів та перенапруг необхідно встановити систему заземлення та розрядник.

Регулярне технічне обслуговування включатиме очищення панелей прісною водою від соляних відкладень для запобігання ерозії і корозії, а також перевірку цілісності ущільнень і кріплень.

Таким чином, підібрані елементи ФЕС гарантують її високу надійність, довговічність і ефективність роботи у складних умовах агресивного морського середовища відповідно до сучасних стандартів і вимог експлуатації на морських суднах.

Підключення сонячних панелей та високовольтного літій-залізо-фосфатного (LiFePO₄) акумулятора до гібридного інвертора виконується за строго визначеною схемою з дотриманням правил безпеки й технічних норм.

Підключення сонячних панелей:

Сонячні панелі формують струм постійного струму (DC), який надходить на входи інвертора через контролер заряду (якщо він інтегрований, то безпосередньо).

Дроти від панелей під'єднуються до відповідних входів інвертора (PV+ і PV-), враховуючи полярність, використовуючи кабелі з сонячною ізоляцією, стійкі до ультрафіолету та механічних впливів.

Зазвичай встановлюють захисні запобіжники або роз'єднувачі до входів панелей для аварійного відключення і захисту проводки.

Для підвищення безпеки рекомендується монтаж розрядників перенапруги для захисту від імпульсних перенапруг і атмосферних розрядів.

Підключення високовольтного LiFePO₄ акумулятора здійснюється наступним чином:

Високовольтна АКБ підключається до спеціальних акумуляторних входів гібридного інвертора (Battery+ і Battery-).

Використовують відповідні товсті кабелі з низьким опором і якісними терміналами для зниження втрат і запобігання перегріванню.

Перед підключенням важливо перевірити напругу і стан акумулятора, що відповідають вимогам інвертора.

В обов'язковому порядку підключається система управління акумуляторними батареями (BMS), яка контролює заряд, розряд, температури і захищає батарею від пошкоджень.

Також встановлюють запобіжники, автомати захисту та пристрої відключення для безпечної роботи акумулятора.

Загальні вимоги та рекомендації:

Всі з'єднання мають бути надійними, закріпленими і захищеними від корозії, особливо в морському середовищі.

Усі ланцюги постійного струму слід виконувати з урахуванням максимальної струмової навантаженості та відповідних стандартів якості кабелів.

Перед пусконаладженням система проходить перевірку правильності підключень, відсутності коротких замикань, роботи захисних пристроїв.

Гібридний інвертор автоматично координує роботу сонячних панелей та акумулятора, оптимізуючи використання енергії і підтримуючи запас батареї для автономного живлення.

Таким чином, грамотне підключення ФЕП і високовольтної літій-залізо-фосфатної акумуляторної батареї до інвертора є ключем до ефективної, безпечної та довговічної роботи всієї гібридної суднової електроенергетичної системи в складних умовах морського середовища.

Гіпотетичний приклад реалізації гібридної електроенергетичної станції на судні типу Ro-Ro наведений у Додатку В.

4.6 Порівняння з аналогами

Експериментальна гібридна сонячна станція на судні типу Ro-Ro має низку ключових переваг у порівнянні з традиційними сонячними системами. По-перше, вона має оптимальне альбомне компонування сонячних панелей, що суттєво знижує парусність судна. Це важливо для зменшення вітрового опору при змінних курсах і швидкості, що покращує морехідність і підвищує загальну енергоефективність судна.

По-друге, гібридна структура установки, що поєднує сонячні панелі (СФЕП), високовольтну акумуляторну батарею LiFePO₄ і резервний дизель-генератор, забезпечує стабільність і безперервність енергетичного живлення. Навіть при раптових змінах погодних умов чи коливаннях навантажень система зберігає баланс між генерацією, накопиченням і споживанням енергії, що підвищує надійність і безпеку суднової електросистеми. Також ця технологія відрізняється більшим потенціалом для зниження експлуатаційних витрат і зменшення викидів шкідливих речовин у порівнянні з традиційними дизельними установками, що важливо для дотримання сучасних екологічних стандартів у морському транспорті.

При застосуванні інтелектуального управління режимами роботи та адаптації до конкретних умов експлуатації, система демонструє високі показники енергоспоживання і довговічності в агресивному морському середовищі, що робить її перспективною для широкого впровадження на суднах типу Ro-Ro та інших класах суден.

Таким чином, експериментальна установка представляє собою системне рішення, яке поєднує технічні інновації, підвищену ефективність і екологічну безпеку, істотно перевершуючи традиційні аналоги за комплексом ключових характеристик.

Висновки до розділу 4:

1. Експериментальна гібридна електроенергетична система на судні типу Ro-Ro демонструє значний потенціал у трансформації морського транспорту в бік більшої енергоефективності, автономності та екологічної безпеки. Вона інтегрує відновлювані джерела енергії, зокрема сонячні панелі, з акумуляторними батареями та традиційними генераторами судна, що приводить до комплексних переваг.

2. Впровадження ФЕС в електроенергетичну систему судна типу Ro-Ro дозволяє значно знизити залежність від дизельних генераторів, забезпечуючи автономність електроживлення завдяки накопиченню та використанню енергії з акумуляторів і сонячних панелей. Це особливо важливо у випадках перебоїв у роботі основних двигунів або для живлення допоміжних систем під час стоянки.

3. Гібридна система забезпечує резервне живлення та стабільність енергопотоків завдяки автоматичному перемиканню між джерелами (панелі, батареї, генератори). Це підвищує безпеку енергопостачання та знижує ризики відключення електроживлення, що критично для систем керування судном, навігації та аварійного живлення.

4. Впровадження ФЕС в електроенергетичну систему судна типу Ro-Ro сприяє зниженню споживання дизельного палива, а отже і викидів парникових газів та шкідливих речовин у атмосферу. Запровадження відновлюваних джерел і енергозберігаючих технологій реалізує вимоги міжнародних екологічних стандартів і сприяє зниженню експлуатаційних витрат.

5. Практичні аспекти впровадження ФЕС в електроенергетичну систему судна типу Ro-Ro полягають у наступному:

Використання високоефективних літій-залізо-фосфатних батарей з великою ємністю та довгим строком служби.

Оптимальне розміщення сонячних панелей на судні для максимального захоплення сонячної енергії.

Інтелектуальне управління потужностями за допомогою гібридного інвертора для балансування джерел та навантаження.

Забезпечення стійкості та надійності електрообладнання в агресивному морському середовищі.

6. Таким чином, впровадження ФЕС в електроенергетичну систему судна типу Ro-Ro підтверджує технічну життєздатність і економічну доцільність застосування гібридних енергетичних систем у морській індустрії, сприяючи підвищенню енергоефективності, безпеки та екологічності судноплавства.

ВИСНОВКИ

Мета роботи у вигляді дослідження можливості підвищення надійності і ефективності функціонування гібридних суднових електроенергетичних систем суден типу Ro-Ro за рахунок впровадження до їх складу фотоелектричних електростанцій в якості резервного джерела електричної енергії, досягнута шляхом вирішення науково-практичних завдань, що дозволило отримати наступні результати та висновки.

1. Виконаний аналіз існуючих рішень побудови гібридних електростанцій дозволив встановити переваги та обмеження їх застосування у складі СЕЕС.

2. Визначені принципи побудови суднових гібридних електростанцій з дублюючими дизель-генераторними установками та розглянуті структурні схеми таких систем.

3. На основі оцінки потенціалу сонячного випромінювання обґрунтований вибір складу і структури гібридного електроенергетичного комплексу суднового призначення.

4. Розглянуті сучасні тенденції і перспективи у розвитку гібридних суднових електроенергетичних систем та запропоновані рішення, що відповідають техніко-економічним вимогам щодо їх застосування.

5. Проведений аналіз процесів у фотоелектричних системах вказує на те, що пропоновані схеми побудови фотоелектричних систем різноманітні та вимагають застосування спеціалізованого енергетичного обладнання, а ефективність всієї електроенергетичної системи визначається складом і характеристиками енергетичного обладнання.

6. Проведений аналіз процесів у фотоелектричних перетворювачах та акумуляторах дозволив визначити переваги та недоліки застосування ФЕС у складі суднових ГЕС.

7. Розроблена та реалізована комп'ютерна модель фотоелектричних перетворювачів, як складових ФЕС, що дозволило дослідити їх властивості та отримати вольт-амперні і навантажувальні характеристики.

8. Розроблений алгоритм роботи схеми управління процесами у фотоелектричній станції, яка входить до складу гібридної електростанції судна

типу Ro-Ro у якості резервного джерела електропостачання.

9. Запропонована експериментальна гібридна електроенергетична система на судні типу Ro-Ro, яка дозволяє виконати апробацію технічних рішень і демонструє значний потенціал у трансформації морського транспорту в бік більшої енергоефективності, автономності та екологічної безпеки. Такий підхід інтегрує відновлювані джерела енергії, зокрема сонячні панелі, з акумуляторними батареями та традиційними генераторами судна, що приводить до комплексних переваг.

10. Встановлено, що впровадження ФЕС в електроенергетичну систему судна типу Ro-Ro дозволяє значно знизити залежність від дизельних генераторів, забезпечуючи автономність електроживлення завдяки накопиченню та використанню енергії з акумуляторів і сонячних панелей.

11. Встановлено, що гібридна система може забезпечити резервне живлення та стабільність енергопотоків завдяки автоматичному перемиканню між різними джерелами (панелі, батареї, генератори), і, тим самим, підвищує безпеку енергопостачання та знижує ризики відключення електроживлення, що критично для систем керування судном, навігації та аварійного живлення.

12. Впровадження ФЕС в електроенергетичну систему судна типу Ro-Ro сприяє зниженню споживання дизельного палива, а отже і викидів парникових газів та шкідливих речовин у атмосферу. Запровадження відновлюваних джерел і енергозберігаючих технологій реалізує вимоги міжнародних екологічних стандартів і сприяє зниженню експлуатаційних витрат.

Результати роботи загалом дозволяють обґрунтувати загальний висновок, що впровадження ФЕС в електроенергетичну систему судна типу Ro-Ro підтверджує технічну життєздатність і економічну доцільність застосування гібридних енергетичних систем у морській індустрії, сприяючи підвищенню енергоефективності, безпеки та екологічності судноплавства.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів управління та діагностування гібридних систем у складі СЕЕС та розробку економічно вигідних технічних рішень для впровадження таких систем у судноплавстві.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гвоздева І.М. Проблемні питання оцінки та прогнозу технічного стану дизель - генераторних установок із застосуванням нейромережових технологій // І.М. Гвоздева, В.Ф. Миргород, В.А. Шевченко, Я.І. Чуйко, В.І. Крицький. Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 22-23.10.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025.
2. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/>
3. Електронний ресурс. Режим доступу: https://www.gpee.com.ua/news_item/396
4. Hmam, Sadok, J. C. Olivier, S. Bourguet, and L. Loron. “Techno-economic optimization of a supercapacitor based energy storage unit chain: Application on the first quick charge plug-in ferry.” *Applied Energy* 153 (2015). P. 3–14.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.054.
5. International Maritime Organization (IMO), 2022 Resolution MEPC, 2022. - Vol. 78.
6. Zahedi B., Norum L.E., Ludvigsen K.B. Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems // *Journal of Power Sources*. 2014. Vol. 255. Pp. 341-354.
7. Dedes, E.K., Hudson, D.A., Turnock, S.R.: Investigation of diesel hybrid systems for fuel oil reduction in slow speed ocean going ships. *Energy*. J. 114, 2016. - Pp. 444–456.
8. Bassam, A.M., Phillips, A.B., Turnock, S.R.: Development of a multi-scheme energy management strategy for a hybrid fuel cell driven passenger ship. *Int. J. Hydrogen Energ.* 42, 2017. - pp. 623–635.
9. Мережі постійного і змінного струму з альтернативними джерелами енергії – 2: Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Є.В. Вербицький– Електронні текстові дані (1 файл: 4,3 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 96 с.

10. Будашко В.В. Підвищення ефективності функціонування суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. –Одеса. – 2017. – 57 с.

11. He Yin, Hai Lan, Ying-Yi Hong, Zhuangwei Wang, Peng Cheng, Dan Li and Dong Guo. A Comprehensive Review of Shipboard Power Systems with New Energy Sources. *Energies* 2023, 16, 2307 – 44 p.

12. Будашко В. В. Підвищення ефективності функціонування суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту (0701 – транспорт і транспортна інфраструктура). – Національний університет «Одеська морська академія), Одеса, 2017. – 450 с.

13. Шевченко В. А. Удосконалення управління технічними системами та комплексами при експлуатації судна. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту (0701 – транспорт і транспортна інфраструктура). – Національний університет «Одеська морська академія), Одеса, 2017. – 350 с.

14. Колонтаєвський Ю. П. Перетворювальна техніка в нетрадиційній та відновлювальній електроенергетиці : навч. посібник / Ю. П. Колонтаєвський, Д. В. Тугай; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 67 с.

15. Dedes, Eleftherios K., Dominic A. Hudson, and Stephen R. Turnock. “Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping.” *Energy policy* 40 (2012). P. 204–218.

DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.046.

16. Stevens, Laurence, C. Sys, T. Vanelslander, and E. Van Hassel. “Is new emission legislation stimulating the implementation of sustainable and energy-efficient maritime technologies?” *Research in transportation business & management* 17 (2015). P. 14-25. DOI: 10.1016/j.rtbm.2015.10.003.

17. Ципа А.В., Гвоздева І.М. Шляхи підвищення показників ефективності роботи суднової електроенергетичної системи за рахунок використання фотоелектричних систем та електролізерів / А.В. Ципа, І.М. Гвоздева / Труды 14 науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика» Одеса. – НУ «ОМА». – 2024. – С. 49–54.

18. Thounthong, Phatiphat, Stephane Rael, and Bernard Davat. “Energy management of fuel cell/battery/ supercapacitor hybrid power source for vehicle applications.” *Journal of Power Sources* 193.1 (2009). P. 376–385.

DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.12.120.

19. Zahedi, Bijan, Lars E. Norum, and Kristine B. Ludvigsen. “Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems.” *Journal of Power Sources* 255 (2014): 341–354. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.031.

20. Doerry, Norbert, John Amy, and Cy Krolick. “History and the status of electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends in the US Navy.” *Proceedings of the IEEE* 103.12 (2015): 2243–2251.

DOI: 10.1109/JPROC.2015.2494159

21. Doerry, Norbert. “Naval power systems: Integrated power systems for the continuity of the electrical power supply.” *IEEE Electrification Magazine* 3.2 (2015): 12–21. DOI: 10.1109/MELE.2015.2413434.

22. Grigoryev, Andrey V., Aleksej Yu. Vasilyev, and Yurii A. Kulagin. “Theoretical issues of calculation of short-circuit currents in shipboard electric power systems with electric power distribution on a direct current.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1095–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1095-1103.

23. Lan H. Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system / H. Lan, S. Wen, Y. Y. Hong, C. Y. David, L. Zhang // *Applied energy*. — 2015. — Vol. 158. — Pp. 26–34. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.08.031/

24. Liu, Hongda, Q. Zhang, X. Qi, Y. Han, and F. Lu. “Estimation of PV output power in moving and rocking hybrid energy marine ships.” *Applied Energy* 204 (2017): 362–372. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.07.014.

25. Колонтаєвський Ю. П. Фотоенергетика : навч. посібник / Ю. П. Колонтаєвський, Д. В. Тугай, С. В. Котелевець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 160 с.

26. Research cell record efficiency chart. The National Center for Photovoltaics (NCPV) at the National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2015. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.nrel.gov/ncpv/>

27. Ali Sayigh. Comprehensive Renewable Energy. Volume One. Photovoltaic Solar Energy // Elsevier Ltd – 2012. – P. 746. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com.focus.lib.kth.se/>

28. Atmospheric Science Data Center. NASA Surface meteorology and Solar Energy, 2016. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?>

29. GENERATOR TYPE ECO 38-3SN/4 – Dinatек. Режим доступа: <https://dinatek.ec/wp-content/uploads/pdf/ficha/FGV38-Ficha-Alternador-Meccalte-38-3SN-4.pdf>

30. SEEAA-2023 <http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/SEEAA-2023.22.11.23.pdf>

31. Загальносуднові системи. Режим доступа: <http://rp.onmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/4333/1.%20%D0%97%D0%B0%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B8%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%BA%D1%82%20%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D0%B9.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

32. Альтернатор Месс Alte ECO38-3S/4. Режим доступа:

<https://meccalte-power.com/product/alternator-meccalte-eco38-3s-4/>

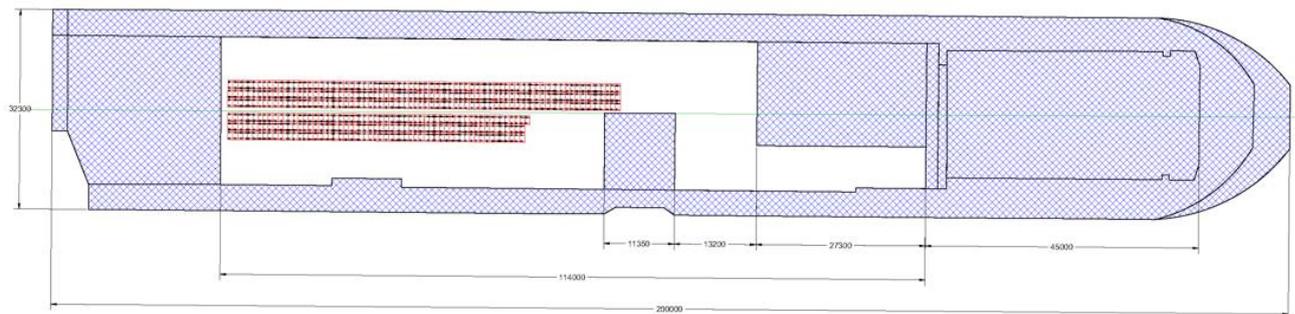
33. Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт. Режим доступа: <http://onma.edu.ua/wp-content/uploads/2022/06/Tezysy-2022-1.pdf>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕЯКИХ ТИПІВ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

Акумулятор	Розрядна ємність, А·ч	Питома енергія Вт·ч/кг / Вт·ч/л	Габаритні розміри, мм
LT-LYP 240	240	79,2/119,1	337x163x117
LT-LYP 380	380	82,2/132,2	337x163x167
LT-LYP 770	770	93,0/154,2	337x163x289
LT-LFP 300	300,0	107/160	349x162x114
LT-LFP 20	20,0	121/187	320x150x12
LT-LFP 75	75,0	124/190	320x150x31
INCP-611678	6,0	145/345	78x61x16
INCP-522676	7,5	127/297	76x52x26
INCP77/25/63	10,5	130/310	76x52x26
INCP95/28/151	35,0	145/335	95x28x140
HP-PW- 40АН 3.2V	40	84,8/102,2	113x66x168
HP-PW-100АН3.2V	100	100,9/151	163x51x278
HP-CT-200АН 3.2V	200	100/145,2	255x70x247

ДОДАТОК Б Розташування ФЕС на судні типу Ro-Ro



**ДОДАТОК В ГІПОТЕТИЧНИЙ ПРИКЛАД РЕАЛІЗАЦІЇ ГІБРИДНОЇ
СТАНЦІЇ НА СУДНІ ТИПУ Ro-Ro**

