

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Центр перепідготовки та післядипломної освіти
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ГІБРИДНОЇ ЕНЕРГО-
УСТАНОВКИ НА ОСНОВІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ
ТА МІКРО-ГЕС**

Виконав студент II курсу, групи ЕТмд-61
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

<u>Копит М.Б.</u>
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник	<u>Коваль В.П.</u>
	(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль	<u>Мовчан Л.Т.</u>
	(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри	<u>Коваль В.П.</u>
	(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент	<u>Шелестовський Б.Г.</u>
	(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет

Центр перепідготовки та післядипломної освіти

Кафедра

електричної інженерії

Затверджую

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня

магістр

за спеціальністю

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

студенту

Копит Мар'яні Богданівні

1. Тема роботи *Енергоефективність гібридної енерго-установки на основі фотоелектричних панелей та мікро-ГЕС*

Керівник роботи *к.т.н., доц. Коваль В.П.*

Затверджені наказом ректора від «10» жовтня 2024 року № 4/7-985.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 23.12.2024

3. Вихідні дані до роботи *Гібридна енерго-установки на основі фотоелектричних панелей та мікро-ГЕС повинна забезпечити електроенергією 50 домогосподарств встановленою потужністю до 180 кВт*

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

- Гідроенергетичні та фотоелектричні системи
- Математичні залежності, що описують роботу сонячних фотоелектричних систем
- Математичні залежності, що описують роботу мікро-ГЕС
- Структура запропонованої системи мікромережі
- Алгоритм керування енергоспоживанням
- Результати моделювання при різних випадках

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

- Класифікація мікромереж
- Принципова схема МГЕС
- Архітектура гібридної мікромережевої системи
- Алгоритм керування енергоспоживанням
- Імітаційна модель системи
- Вихідна потужність фотоелектричної системи при постійному опроміненні
- Вихідна потужність МГЕС
- Характеристики системи (а) освітленість, потужність фотоелектричних установок, (в) потужність МГЕС (г) потужність навантаження (д) коефіцієнт сонячного випромінювання та (е) потужність акумулятора

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ</i>		
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Клепчик В.М., ст. викладач кафедри ХО</i>		

7. Дата видачі завдання 11.10.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд за напрямком кваліфікаційної роботи	з 18.11.2024	
		по 23.11.2024	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки	з 23.11.2024	
	кваліфікаційної роботи	по 05.12.2024	
3	Підготовка розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	з 06.12.2024	
		по 08.12.2024	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	з 09.12.2024	
		по 10.12.2024	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	з 11.12.2024	
		по 12.12.2024	
6	Підготовка, оформлення та друк графічного матеріалу	з 12.12.2024	
	кваліфікаційної роботи	по 14.12.2024	
7	Отримання відгуку та рецензії на кваліфікаційну роботу, підготовка доповіді на захист	з 14.12.2024	
		по 20.12.2024	

Студент

(підпис)

Копит М. Б.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 89 сторінок, __ аркушів презентації, 52 ілюстрації, 4 таблиці та 27 використаних першоджерел.

Об'єкт дослідження – процес перетворення енергії з відновлювальних джерел у електроенергію із заданими параметрами для електропостачання споживачів

Предмет дослідження – гібридна мікромережева система електропостачання.

Метою кваліфікаційної роботи є: розробка гібридної мікромережевої системи електропостачання з резервним накопичувачем енергії для сільської місцевості

Розроблено гібридну мікромережеву систему електропостачання з резервним накопичувачем енергії. Система генерує 180 кВт для 50 домогосподарств. Вона складається з фотоелектричних панелей встановленою потужністю 100 кВт, підвищувального перетворювача постійного струму, системи МГЕС встановленою потужністю 95 кВт, системи зберігання на основі літій-іонних акумуляторів такою ємністю щоб забезпечити добове енергоживлення, двонаправленого перетворювача постійного струму та трифазного інвертора. Розроблено алгоритм керування енергоспоживанням та проведено перевірку його роботи шляхом імітаційного моделювання для чотирьох випадків у середовищі Matlab/Simulink. Результати моделювання доводять, що запропонований алгоритм керування енергоспоживанням здатний захистити батарею, контролюючи заряджання та розряджання. Крім того, забезпечується безперервний потік енергії для задоволення попиту навантаження навіть при коливаннях у електропостачанні.

Ключові слова: **СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, ГІДРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.**

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Системи мікромереж.....	9
1.2 Гідроенергетичні системи	10
1.3 Фотоелектричні системи	14
1.4 Відстеження точки максимальної потужності (MPPT).....	15
1.5 Висновки до розділу	16
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	17
2.1 Структура мікромережі	17
2.2 Математичні залежності, що описують роботу сонячних фотоелектричних систем	18
2.3 Перетворювачі потужності	20
2.3.1 Двонаправлений перетворювач постійного струму в постійний.....	20
2.3.2 Інвертор	21
2.4 Математичні залежності, що описують роботу мікро-ГЕС.....	22
2.5 Структура запропонованої системи мікромережі	32
2.6 Модель фотоелектричного елемента	34
2.7 Розрахунок необхідної потужності фотоелектричної системи	35
2.8 Розрахунок DC-DC перетворювача.....	39
2.9 Імітаційна модель інвертора (DC-AC)	42
2.10 Розрахунок вихідного фільтра	44
2.11 Мікро-ГЕС та розрахунок її потужності.....	46
2.12 Роль акумуляторної батареї в мікромережі.....	51
2.13 Моделювання акумуляторної батареї та двонаправленого перетворювача	52

2.14 Алгоритм керування енергоспоживанням.....	57
2.15 Висновки до розділу	58
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	60
3.1 Вихідні дані та методика імітаційного моделювання	60
3.2 Випадок 1	62
3.3 Випадок 2	68
3.4 Випадок 3	71
3.5 Випадок 4	73
3.6 Аналіз результатів.....	75
3.7 Висновки до розділу	77
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	
4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання.....	79
4.2 Заходи безпеки при монтажі енергоустановок	80
4.3 Організація оповіщення персоналу об'єктів та населення про НС техногенного і природного характеру	82
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	84
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	86

ВСТУП

Актуальність теми. Зростання чисельності населення підвищило рівень життя, а розвиток технологій призвів до експоненціального зростання споживання електроенергії. Зменшення запасів викопного палива, таким чином, зменшується через збільшення попиту на енергію. Спалювання викопного палива як джерела енергії призводить до повсюдного погіршення стану довкілля, особливо до глобальної зміни клімату, спричиненої викидами парникових газів. Як наслідок, існує нагальна потреба обмежити викиди вуглецю без шкоди для загального доступу до сучасних джерел енергії, соціально-економічного розвитку, створення робочих місць, скорочення бідності, що є запорукою досягнення цілей сталого розвитку. Дефіцит доступу до енергії пов'язаний з недостатнім соціально-економічним розвитком, що є одним з факторів, які призводять до бідності. У світі налічується близько 1,4 мільярда людей, які не мають доступу до електроенергії, 85% з них проживають у сільській місцевості.

Останні технологічні досягнення та зростання чисельності населення призвели до збільшення попиту на енергію, що спричиняє викиди парникових газів через спалювання викопного палива для задоволення попиту на електроенергію. Доступ до енергії сприяє соціально-економічному розвитку будь-якої країни, і в усьому світі зростає прагнення використовувати більше відновлюваної енергії.

Інфраструктура електроенергетики, що стосується мереж передачі та розподілу електроенергії, старіє, і вони становлять проблему, оскільки вся система має централізовану загальну систему управління мережею. Невідновлювані джерела енергії стають все дорожчими, тому інтеграція відновлюваних джерел енергії є реалістичним рішенням для майбутніх поколінь. Нестабільна природа більшості відновлюваних джерел енергії робить системи зберігання енергії та управління дуже важливими для безперебійної

роботи. Саме тому робота над впровадженням відновлювальних джерел енергії є актуальною.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є: розробка гібридної мікромережевої системи електропостачання з резервним накопичувачем енергії для сільської місцевості.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати історію розвитку фотоелектричних та гідроенергетичних систем.
2. Розробити гібридну мікромережеву систему електропостачання для 50 домогосподарств з встановленою потужністю до 180 кВт.
3. Розробити алгоритм керування енергоспоживанням.
4. Провести перевірку роботи алгоритму керування енергоспоживанням шляхом імітаційного моделювання.
5. Описати питання з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Об'єкт дослідження – процес перетворення енергії з відновлювальних джерел у електроенергію із заданими параметрами для електропостачання споживачів.

Предмет дослідження – гібридна мікромережева система електропостачання.

Наукова новизна отриманих результатів.

Дістав подальший розвиток підхід до підвищення ефективності розподілу, споживання та накопичення електроенергії, отриманої від відновлювальних джерел енергії.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблено гібридну мікромережеву систему електропостачання з резервним накопичувачем енергії. Вона складається з фотоелектричних панелей встановленою потужністю 100 кВт, підвищувального перетворювача постійного струму, системи МГЕС встановленою потужністю 95 кВт, системи зберігання на основі літій-іонних акумуляторів такою ємністю щоб забезпечити

добове енергоживлення, двонаправленого перетворювача постійного струму та трифазного інвертора. Система генерує 180 кВт для 50 домогосподарств.

Апробація. Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на XIII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 11–12 груд. 2024 року. ТНТУ [1]

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (27 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 89 сторінок, 4 таблиць, 52 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Системи мікромереж

Мікромережа - це поєднання керованих навантажень, розподіленої генерації (РГ) та систем зберігання енергії (СЗЕ). РГ складається з декількох основних технологій, таких як мікротурбіни, сонячні енергетичні системи, газові турбіни, паливні елементи, вітроенергетика та двигуни внутрішнього згоряння. Генератори змінного струму у вигляді відновлюваних джерел енергії стали дуже важливим гравцем як в електрифікації, так і в скороченні викидів вуглекислого газу. Єдина система з використанням силових електронних інтерфейсів може бути сформована між різними джерелами енергії та навантаженням для забезпечення безперебійної та ефективної генерації електроенергії, що постачається до навантаження.

Існує три основні типи мікромереж: мікромережі змінного струму, мікромережі постійного струму та гібридні мікромережі, і вони відрізняються залежно від їх застосування в різних контекстах. Ці мікромережі можуть використовуватися в різних сферах як автономно, так і паралельно з електромережею. Автономна система може бути розподіленою мережею змінного або постійного струму, яка може включати накопичувачі енергії [2].



Рисунок 1.1 - Класифікація мікромереж

По-перше, мікромережа змінного струму є найбільш переважною через простоту підключення до існуючої інфраструктури від мережі без використання перетворювачів електроенергії. По-друге, навантаження не потрібно переналаштовувати, але розподілені генератори потребують підключення

перетворювачів електроенергії до шини змінного струму. Мікромережі змінного струму сприяють стабільності енергосистеми, забезпечуючи підтримку реактивної потужності для балансування та допоміжних послуг.

Хоча мікромережі змінного струму є більш переважними, ніж мікромережі постійного струму, мікромережі постійного струму починають набирати обертів, оскільки більшість джерел постійного струму виробляють електроенергію постійного струму, яка також має незначні проблеми з якістю електроенергії. Це також вигідно, оскільки більшість електронних пристроїв, таких як комп'ютери, промислові прилади, побутова техніка, використовують енергію постійного струму, а це призведе до зменшення потужності електронних пристроїв, що в кінцевому підсумку призведе до здешевлення системи. Недоліком мікромереж постійного струму є недостатня зрілість системи та брак захисного обладнання [3].

Гібридні системи поєднують в собі мікромережі постійного та змінного струму, і вони взаємодіють за допомогою пристроїв силової електроніки для забезпечення належної роботи гібридної системи. Навантаження постійного струму може живитися від джерела постійного струму, а навантаження змінного струму - від джерела змінного струму, що робить систему більш надійною та гнучкою [3].

1.2 Гідроенергетичні системи

Сонце все ще залишається основним джерелом енергії і відповідає за кругообіг води. Сонце під час гідрологічного циклу нагріває воду з поверхні землі, включаючи сушу і водойми, тому вологе повітря піднімається вгору в процесі, відомому як випаровування, оскільки більша частина повітря, що піднімається, охолоджується і конденсується, утворюючи хмари. Наступним процесом є випадання опадів, коли вода опускається з атмосфери внаслідок коалесценції - процесу, коли маленькі краплі зливаються з великою краплею, і важча крапля падає під дією власної ваги. Досягнувши земної поверхні, вода

поглинається ґрунтом, а частина поверхневого стоку потрапляє у водойми як підземні води. Цей процес відбувається постійно, і він також відомий як кругообіг води.

Термін «гідро» походить від грецької назви води і є одним з екологічно чистих джерел енергії. Найбільш ранні інновації в галузі гідроенергетики існували в період правління династії Хань між 202 р. до н.е. і 9 р. н.е. в Китаї. Вертикально встановлене водяне колесо використовувалося для приведення в дію молотів, які мололи і лушили зерно, дробили руду, а також у ранньому виробництві паперу. Економічне зростання та водна енергія доповнювали одне одного, і в 1771 році на млині Кромфорд в англійській долині Дервент була створена перша у світі фабрична система. Це було зроблено Річардом Аркрайтом для прядіння бавовни, і він вірив у гідроенергетику настільки, що використовував паровий двигун для подачі води на млин замість того, щоб приводити в дію механізми. Ключовими досягненнями в гідроенергетиці стали розробки турбін: у 1827 році Бенуа Фурнірон розробив турбіну, здатну виробляти 6 кінських сил (4,5 кВт). У 1849 році Джеймс Френсіс розробив першу сучасну турбіну до 1870 року, а в 20 столітті Аллан Пелтон і Віктор Каплан наслідували його приклад, створивши турбіни Пелтона і Каплана [4]. У 1878 році було реалізовано перший гідроенергетичний проект для забезпечення електроенергією однієї лампи в Грагсайді в Нортумберленді, Англія. У 1882 році у Вісконсині, Сполучені Штати Америки (США), з'явилася перша станція, яка забезпечувала електроенергією приватних і комерційних споживачів, а через десять років працювало вже кілька гідроелектростанцій. На початку 20-го століття США і Канада були в авангарді гідроенергетики. У 1960-1980-х роках найбільші ГЕС були побудовані в Латинській Америці. За останні кілька років Бразилія та Китай випередили інші країни у розвитку гідроенергетики.

Гідроенергетика є відносно дешевою, надійною, сталою та відновлюваною енергією, яка не виробляє токсичних відходів [5,6]. Світ відходить від залежності від викопного палива, виробництво зеленої енергії має першорядне значення для зменшення вуглецевого сліду. Гідроенергетика

відіграє важливу роль у забезпеченні екологічно чистої енергії, забезпечуючи 20% світових потреб в електроенергії.

Більше того, прогнозується, що понад шістдесят країн будуть отримувати більше половини своєї електроенергії від гідроелектростанцій. Мікро-ГЕС стають все більш важливими не тільки для електрифікації сільської місцевості в менш розвинених країнах, але й для Європи, де великі гідроелектростанції вичерпали свій ресурс. Мікрогідроелектростанції (МГЕС) є більш реалістичним рішенням через низькі експлуатаційні витрати, низькі витрати на технічне обслуговування, тривалий термін служби та мінімальний соціально-економічний вплив.

МГЕС виробляють електричну енергію шляхом перетворення кінетичної енергії падаючої води, яка перетворюється на обертання валу, і саме ця механічна енергія перетворюється на електричну за допомогою генератора. Системи МГЕС побудовані таким чином, що вода відводиться з основного потоку, а потім повертається до потоку після обертання турбін, не забруднюючи його. Вода тече вдень і вночі, тому використання МГЕС вимагає менших обсягів зберігання, ніж інші технології. Двома найважливішими факторами, які слід враховувати при використанні гідроенергетики, є швидкість потоку води і гідравлічний напір, тобто висота між входом у водозбірник і турбіною [7].

Чотири основні компоненти, з яких складаються гідроелектростанції, - це гідроагрегат, генератор, турбіна і шлюзи. Вода тече під дією сили тяжіння через гідравлічний напір і надходить через гідроциліндр до турбіни. Регулювання подачі води до турбіни здійснюється за допомогою засувки, які контролюють об'ємний потік води, що надходить до турбіни. Регулювання шлюзу здійснюється за допомогою сервоприводів, які контролюються регулятором.

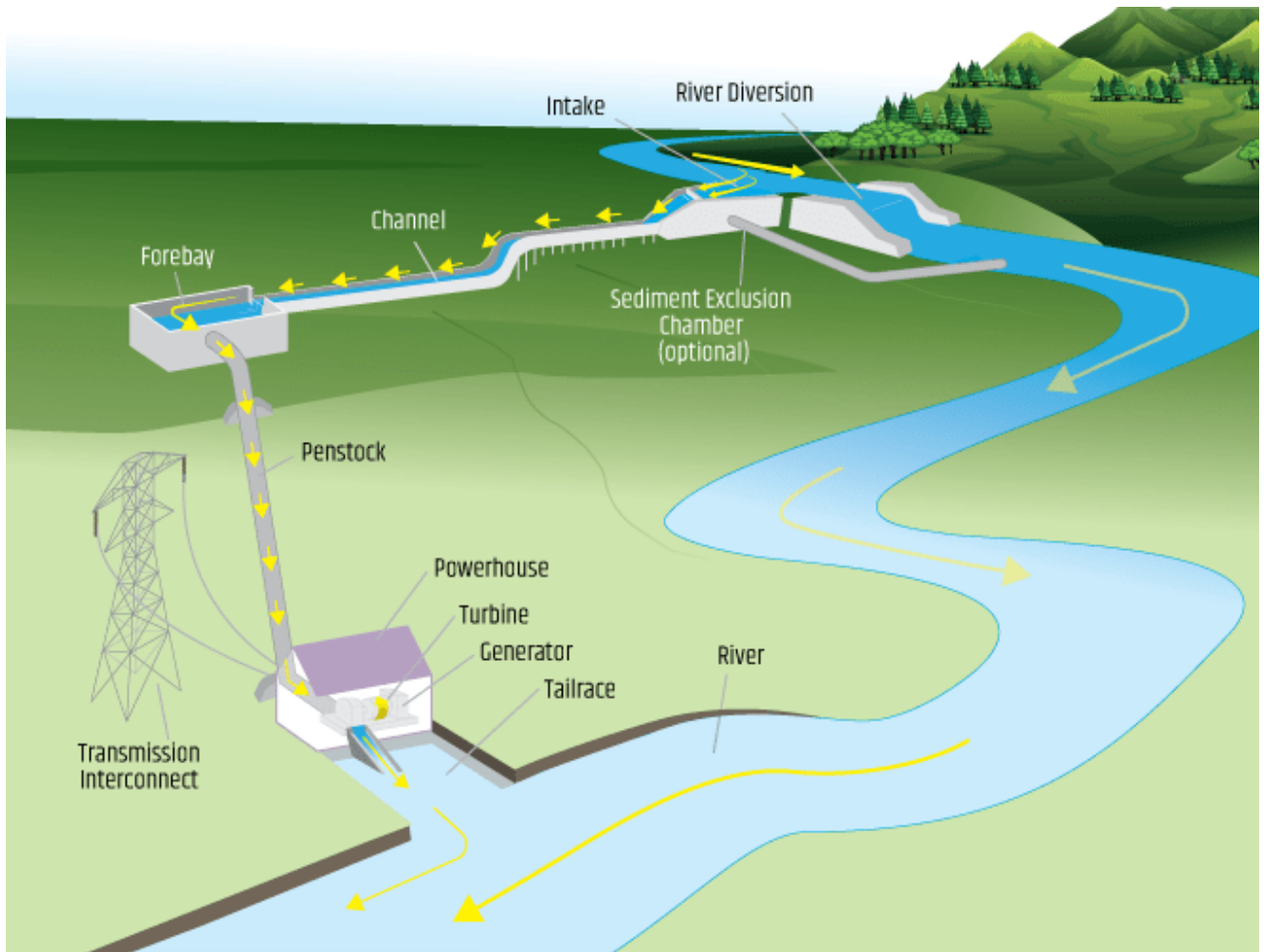


Рисунок 1.2 - Схема мікроГЕС [8]

Гідроенергетика відіграє важливу роль у виробництві електроенергії з відновлюваних джерел, на яку припадає 19% світової енергії [9]. Гідроенергетика складається з різних видів виробництва електроенергії, які класифікуються на основі їхньої встановленої потужності. МГЕС має численні переваги, такі як відсутність викидів, які пов'язані з виробництвом електроенергії з викопних видів палива. Крім того, вони завдають меншої шкоди навколишньому середовищу завдяки меншим обсягам будівництва порівняно з великими ГЕС, що відіграє величезну роль у створенні більш екологічної цивілізації. Створення МГЕС було дешевшим завдяки недорогим електронним регуляторам навантаження, дешевому полівінілхлориду (ПВХ), недорогим турбінам, а це означає низькі інвестиційні витрати.

1.3 Фотоелектричні системи

Електричний потенціал, що виникає під дією енергії фотонів на спільному переході двох різних матеріалів, відомий як фотоелектричний ефект [9-13]. У 1839 році Антуан-Сезар Беккерель, французький фізик, відкрив концепцію фотоелектричного ефекту. У 1877 році Адамс і Дей спостерігали фотоелектричний ефект у твердому селені. У 1883 році Чарльз Фріц розробив перший фотоелектричний елемент, ефективність якого становила менше 1%. Розвиток фотоелектричних елементів продовжувався, і в 1927 році був розроблений новий фотоелектричний елемент, який складався з міді та напівпровідникового оксиду міді, але він також мав ефективність менше 1%. Рассел Ол у 1941 році розробив фотоелектричні елементи з кремнію, які в 1954 році після доопрацювання в Bell Laboratories досягли ККД від 6% до 11%. Перший практичний фотоелектричний генератор був створений у 1958 році потужністю 1 Вт, який використовувався на супутнику Vanguard, а в 1960-х роках, коли космічні дослідження були в розквіті, виникла потреба в підвищенні ефективності фотоелектрики, оскільки для фотоелектричних колекторів потрібно було більше електроенергії, а вартість була другорядною [10].

Сонце є основним джерелом невичерпної безкоштовної енергії в усьому світі, і з'являються нові технології для використання сонячної енергії для виробництва електроенергії. За рік чотири мільйони ексаджоулів ($1 \cdot 10^{18}$) сонячної енергії досягають поверхні Землі. Це означає, що сонячна енергія, яка досягає Землі, може задовольнити всі світові енергетичні потреби, але проблема полягає в тому, що технології, які можуть ефективно збирати цю енергію, ще не доступні. Незважаючи на цей величезний потенціал, внесок сонячної енергії все ще дуже низький, але деякі заходи вживаються для зменшення викидів вуглецю, і це проливає величезне світло на перспективи сонячної енергетики. Крім того, це зменшує проблеми, пов'язані з

енергетичною безпекою, зміною клімату, безробіттям, а також може допомогти в транспортному секторі [12].

Існує дві основні сфери застосування сонячної енергії: сонячна теплоенергетика та сонячна електроенергетика. Сонячна теплоенергетика використовує пряме джерело теплової енергії - сонце, тоді як для виробництва електроенергії енергія сонця у вигляді сонячного світла перетворюється на електричну енергію за допомогою фотоелектричного процесу [14].

Зараз спостерігається бум «розумних» електромереж, в центрі яких знаходяться відновлювані джерела енергії. Цей пошук «зеленої» енергії зумовлений зменшенням запасів викопного палива, зростанням кількості природних екологічних катастроф і необхідністю зменшити забруднення, спричинене викопним паливом. Фотоелектричні системи відіграють важливу роль, головним чином тому, що вони не спричиняють погіршення стану навколишнього середовища, а також завдяки своїм технічним перевагам, оскільки вони можуть використовуватися як гібридні, автономні або підключені до електромережі джерела енергії. Фотоелектричні станції мають ряд переваг, які полягають у тому, що під час виробництва енергії вони не забруднюють навколишнє середовище, мають термін служби 25-30 років, не мають експлуатаційних витрат, а їх обслуговування є низьким. Фотоелектричні модулі також мають обмеження з точки зору їх ефективності перетворення (12-15%), продуктивність фотоелектричних модулів відхиляється в результаті погодних умов, таких як швидкість вітру, температура навколишнього середовища, відносна вологість і накопичений пил, які впливають на кількість світла, що потрапляє на фотоелектричний масив, а отже, і на вихідну енергію. Підвищення температури поверхні фотомодуля на 1°C призводить до зниження ефективності на 0,5% [15].

1.4 Відстеження точки максимальної потужності (MPPT)

Вихідна потужність сонячних фотоелектричних модулів залежить від атмосферних умов, що створює проблему змінної потужності. Рішенням є

MPPT, яке відіграє вирішальну роль у вилученні максимальної потужності з фотоелектричного модуля. Різні методи допомагають досягти точки максимальної потужності (ТМП), і якщо вона змінюється в залежності від методу, алгоритму управління та швидкості, з якою ТМП досягається. Топологія мікромереж залежить від типу перетворювачів електроенергії, які бувають AC-DC, DC-AC та DC-DC. MPPT складається з підвищувального або понижувального DC-DC перетворювача для регулювання напруги та струму на навантаженні. Це досягається за допомогою схеми керування робочим циклом. Існує кілька методів керування MPPT, а саме

- метод збурення і спостереження (P&O);
- метод інкрементної провідності (InCond);
- постійний струм або постійна напруга;
- передові методи (нечітке керування, нейронні мережі та схема на основі напруги [15]).

1.4 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз видів мікромереж. Виділено особливості кожного виду та переваги використання.
2. Проаналізовано історію розвитку гідроенергетичних систем, принцип роботи, їх роль в енергосистемі на сьогоднішній день та переваги над іншими поновлювальними джерелами енергії.
3. Розкрито суть фотоелектрики та історію її становлення, сфери застосування, особливості використання та переваги над іншими системами електропостачання.
4. Проведено аналіз способів отримання найбільшої енергії від фотоелектричних та гідроенергетичних систем.
5. Встановлено, що зараз спостерігається бум «розумних» електроммереж, в центрі яких знаходяться відновлювані джерела енергії.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Структура мікромережі

Високий рівень проникнення розподілених джерел енергії вимагає силових електронних пристроїв для взаємодії між генерацією та навантаженням [16]. Вони керують потоком потужності, підтримують вихідну частоту та напругу у випадку інвертора. Висока частка відновлюваної генерації призводить до зменшення інерційності, що є критично важливим для підтримки стабільності частоти в енергосистемах. Зараз використовується віртуальна інерція, що генерується конденсаторами ланки постійного струму силових електронних перетворювачів. Ланка постійного струму також використовується в суперконденсаторах, а акумуляторні батареї також використовуються як альтернативний постачальник інерції. Технологічний прогрес у галузі напівпровідників та керування призведе до того, що силова електроніка незабаром стане зрілою для керування інерційністю.

Напівпровідникові пристрої були відкриті в 1950 році, і з тих пір було проведено величезну кількість досліджень в цій галузі. Протягом останніх трьох десятиліть спостерігався стрімкий розвиток силових електроніки завдяки вдосконаленню напівпровідникових приладів та мікропроцесорних технологій [17,18]

Розподільні генератори (РГ), такі як вітрові турбіни та фотоелектричні системи, що утворюють мікромережі, призводять до нестабільності системи, яка не забезпечує безперервну потужність. Це пов'язано з відсутністю інерційності або меншою порівняно з генератором інерційністю для забезпечення енергетичного балансу. Рішенням, що робить це можливим, є підключення до мережі або трифазного джерела - використання пристроїв силових електроніки. Ці пристрої допомагають у підключенні РГ до мережі, змінюючи потужність від джерела РГ на змінний струм фіксованої частоти, вони покращують гнучкість і адаптивність системи та надають допоміжні послуги.

Інтеграція мережі або джерела постійного струму до мережі змінного струму використовує переважно перетворювачі потужності, які є пристроями, що регулюють напругу та частоту, щоб зробити її сумісною з характеристиками мережі (рис.2.1). Розподілена генерація, така як фотоелектричні та паливні елементи, виробляє електроенергію постійного струму, в той час як вітроенергетика та мікротурбіни виробляють електроенергію змінного струму з різною частотою, що вимагає від інвертора взаємодії з мережею з напругою та частотою відповідно до необхідних стандартів [19].

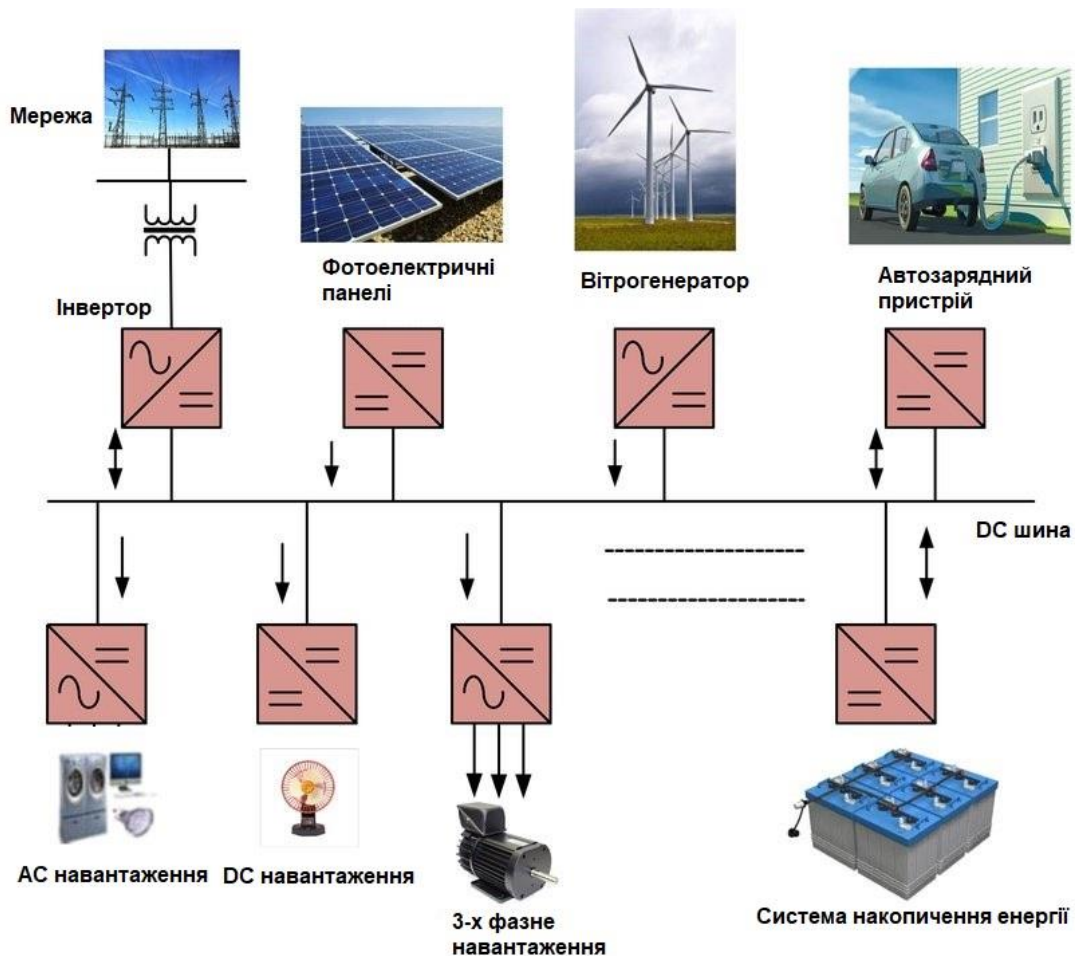


Рисунок 2.1 - Автономна мікромережа що підключена до АС мережі

2.2 Математичні залежності, що описують роботу сонячних фотоелектричних систем

Конструкція фотоелемента передбачає багато складних фізичних принципів, тому еквівалентна схема показана на рис. 2.2 нижче.

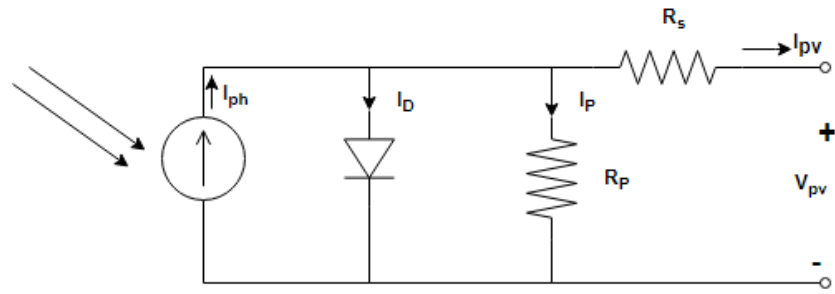


Рисунок 2.2 - Фотоелектричний елемент з одним діодом [19]

Математичне моделювання фотоелектричного елемента з одним діодом базується на наступних рівняннях:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_p, \quad (2.1)$$

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{V_t}} - 1 \right), \quad (2.2)$$

$$I_0 = I_{RS} \left(\frac{T_G}{T_{ref}} \right)^3 e^{\frac{qE \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_G} \right)}{AK}}, \quad (2.3)$$

$$I_p = \frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{R_p}, \quad (2.4)$$

$$V_t = \frac{nKT}{q}, \quad (2.5)$$

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{R_p}, \quad (2.6)$$

Вихідний струм фотоелемента I_{PV} дорівнює струму, який виробляється енергією фотонів I_{ph} , який залежить від робочої температури фотоелемента, безвипромінювального струму діода I_d і струму витоку через шунт заземлення I_p . Залежність вихідного струму і напруги фотоелемента може бути пов'язана шляхом об'єднання рівнянь (2.1 - 2.4), що дає рівняння (2.5) [19].

де A - площа фотоелемента;

V_{oc} - напруга відкритого контуру;

V_t - теплова напруга;

V_{PV} - вихідна напруга елемента;

$R_p \& R_s$ - паразитні опори;

I_d - струм діода;

I_o - струм насичення діода;

q - заряд електрона $= 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кулонів;

n - фактор ідеальності;

K - постійна Больцмана $= 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/°К ;

T - температура за абсолютною шкалою °К.

Опис електричних характеристик елемента залежить від двох найбільш важливих параметрів, якими є напруга холостого ходу V_{oc} і струм короткого замикання I_{sc} . Замикання вихідних клем допомагає вимірювати струм короткого замикання при повному освітленні. Струм витоку на землю відносно I_d і I_{ph} малий, тому його можна ігнорувати, тому максимальна фотонапруга досягається при струмі навантаження $I = 0$, тобто при напрузі холостого ходу.

При короткому замиканні фотоелемента вихідна напруга фотоелемента стає нульовою ($V_{PV} = 0$), а вихідний струм фотоелемента дорівнює струму короткого замикання ($I_{PV} = I_{sc}$).

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{I_{sc} R_s}{V_t}} - 1 \right) - \frac{I_{sc} R_s}{R_p}, \quad (2.7)$$

$$V_{oc} = \frac{nkT_c}{e} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_o} \right) = V_t \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_o} \right). \quad (2.8)$$

2.3 Перетворювачі потужності

2.3.1 Двонаправлений перетворювач постійного струму в постійний

Це пристрій, який використовується як інтерфейс для керування заряджанням і розряджанням акумуляторної батареї. Він використовується там, де є дві фіксовані напруги від джерела постійного струму - від шини постійного струму та акумуляторної батареї.

2.3.2 Інвертор

Коли існують альтернативні джерела енергії, які виробляють електричну енергію з напругою, що не синхронізована, наприклад, генератори постійної напруги та генератори змінної напруги, що працюють з несинхронною швидкістю, виникає потреба в перетворювачі енергії для належного взаємозв'язку, а саме в інверторі. Це пристрій, який перетворює енергію постійного струму в енергію змінного струму з необхідною напругою і частотою, керуючи комутаційним пристроєм з напівпровідника [17]. Інвертори поділяються на дві групи: інвертори з джерелом напруги (ІДН), які регулюють форму напруги, та інвертори з джерелом струму (ІДС), які регулюють форму струму. Існує три типи топології інверторів: напівмостовий інвертор, однофазний інвертор та трифазний інвертор з джерелом напруги [20].

Напівмостовий інвертор

Це тип інвертора, який застосовується для низьковольтних систем (рис. 2.3). Він складається з двох керованих перемикачів. Перемикання допомагає модифікувати джерело постійної напруги у вихідну змінну напругу, і він може використовуватися як перетворювач постійного струму або перетворювач постійного струму в змінний струм. Конденсатори послідовно з'єднані через джерело постійного струму. Перемикачі повинні чергуватися, тому вони не можуть бути ввімкнені одночасно, інакше виникне коротке замикання, яке пошкодить перемикачі [21].

Перетворювач постійного струму в змінний (трифазний інвертор)

Для перетворення джерела постійного струму в трифазний змінний струм використовується інвертор з перемикачами, як показано на рисунку 2.4 нижче. Перемикачі встановлені таким чином, що вони вмикаються і вимикаються через рівні проміжки часу в 60° для отримання трифазної напруги. Перемикання залежить від схеми модуляції, і вимикачі на одній нозі не можуть

вмикатися одночасно, оскільки це призведе до короткого замикання напруги, що суперечить правилу напруги Кірхгофа.

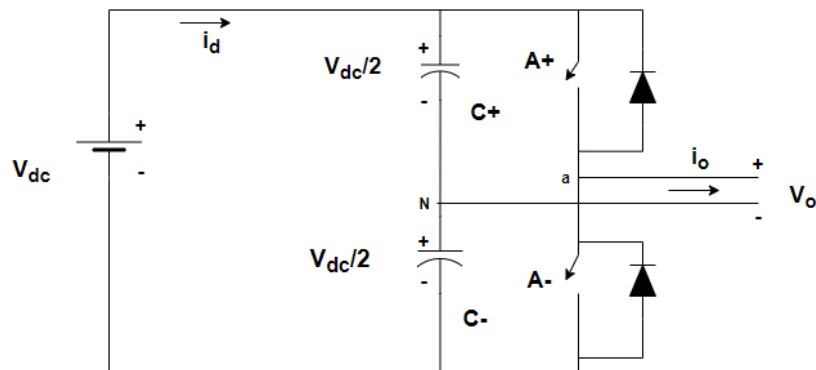


Рисунок 2.3 - Одинарний напівмостовий ІДН

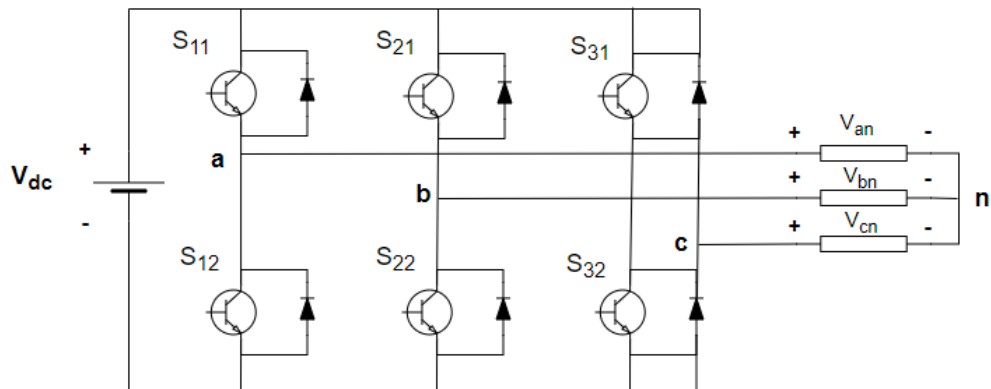


Рисунок 2.4 - Трифазний повний мостовий інвертор

2.4 Математичні залежності, що описують роботу мікро-ГЕС

Електростанція мікро-ГЕС (МГЕС) побудована і спроектована для використання потоків води з річки, і їй потрібне невелике водосховище або взагалі без нього, щоб обертати лопаті турбіни для виробництва електроенергії. МГЕС складається з трьох основних частин, а саме: гідротурбінного регулятора, системи збудження, синхронного генератора та навантаження. На рис. 2.5 зображено принципову схему МГЕС, яка складається з регулятора, гідротурбіни та генератора.

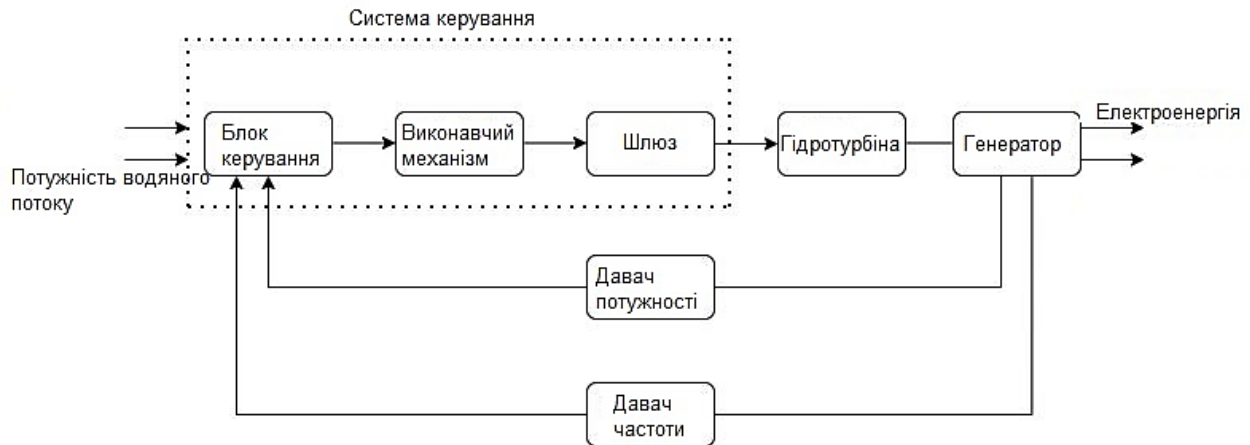


Рисунок 2.5 - Принципова схема МГЕС

Вода рухається з більшої висоти, і це призводить до того, що внаслідок перепаду висот виникає так званий гідравлічний тиск. Потім вода вдаряється об лопаті турбіни зі швидкістю (U). Об'ємна витрата контролюється шлюзом, який приводиться в дію серводвигуном. Механічна потужність визначається за формулою

$$P_m = \eta \rho Q H , \quad (2.9)$$

де P_m - механічна потужність;

η - коефіцієнт корисної дії;

ρ - густина води;

g - гравітаційне прискорення ;

Q - об'ємна витрата ;

H - гідравлічний напір.

Передавальна функція гідравлічної турбіни

Деякі характеристики, що визначають продуктивність гідравлічної турбіни, - це вплив інерції у водяному стовпі, який спрямовує воду до турбін, стисливість води та пружність стінок труб. При моделюванні ідеальної гідравлічної турбіни та дослідженнях стійкості водяного стовпа розглядаються деякі припущення, які не дають чіткої картини при імітації реальних випадків. До уваги беруться наступні припущення:

- гідравлічний опір мінімальний,
- труба з підводним штоком є непружною, а вода - нестисливою,

- швидкість води пропорційна відкриттю шлюзу з квадратним коренем з напору в сітці,
- вихідна потужність турбіни пропорційна добутку напору на об'ємну швидкість потоку.

Характеристики турбіни і плунжера базуються на трьох основних рівняннях, а саме:

- швидкість води в поршні
- механічна потужність турбіни
- прискорення водяного стовпа

Ідеальна модель турбіни

Формула, яка визначає швидкість води в гідрошлюзі

$$U = K_u G \sqrt{H} \quad (2.10)$$

де U - швидкість води;

K_u - коефіцієнт пропорційності;

G - положення шлюза;

H - гідравлічний напір на шлюзі.

Якщо є невелике відхилення від робочої точки, то зміна швидкості води стає

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial U}{\partial G} \Delta G, \quad (2.11)$$

Підставимо вирази для частинних похідних і розділимо на

$$U_0 = K_u G_0 \sqrt{H_0}$$

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta U}{2H_0} + \frac{\Delta G}{G_0},$$

$$\text{або} \quad \Delta \bar{U} = \frac{1}{2} \Delta \bar{H} + \Delta \bar{G}. \quad (2.12)$$

«0» вказує на початкові стаціонарні значення, “Δ” - на малі зміни, а $\bar{}$ - на нормалізовані значення, що базуються на стаціонарних режимах роботи.

Механічна потужність турбіни

Механічна потужність, що виробляється турбіною, залежить від гідравлічного напору (H) і об'ємної витрати (Q), яка є добутком площі (A) і швидкості води (U).

$$P_m = K_p H U . \quad (2.13)$$

Лінеаризуємо через мале відхилення і нормалізуємо шляхом ділення обох частин на $P_{m0} = K_p H_0 U_0$

$$\frac{\Delta P_m}{P_{m0}} = \frac{\Delta H}{H_0} + \frac{\Delta U}{U_0} ,$$

Або

$$\Delta \bar{P}_m = \Delta \bar{H} + \Delta \bar{U} . \quad (2.14)$$

Підставляючи $\Delta \bar{U}$ з рівняння (2.11)

$$\Delta \bar{P}_m = 1,5 \Delta \bar{H} + \Delta \bar{G} . \quad (2.15)$$

Підставляючи ΔH з рівняння (2.11)

$$\Delta \bar{P}_m = 3 \Delta \bar{U} - 2 \Delta \bar{G} \quad (2.16)$$

Прискорення водяного стовпа внаслідок зміни напору на турбіні базується на другому законі Ньютона і визначається за формулою

$$\rho L A \frac{d \Delta U}{dt} = - A \rho g \Delta H , \quad (2.17)$$

де ρ - густина маси;

L - довжина трубопроводу;

A - площа труби;

g - прискорення під дією сили тяжіння;

U - швидкість води;

T - час секунди.

Другий закон Ньютона стає більш очевидним, коли безрозмірний аналіз виконується з використанням фундаментальних одиниць, якими є маса, довжина і час, що допомагає визначити зв'язок між кількома змінними.

$$\rho = \frac{Kg}{m^3} ,$$

$$L \& H = m ,$$

$$A = m^2,$$

$$g = \frac{m}{s^2},$$

$$U = \frac{m}{s},$$

$$t = s,$$

Підставимо основні одиниці в рівняння (2.15)

$$\frac{Kg}{m^3} \cdot m \cdot m^2 \cdot \frac{m}{s^2} = -m^2 \cdot \frac{Kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m.$$

Це відповідає другому закону Ньютона, згідно з яким сила - це зміна маси на швидкість з часом. $F = \text{маса} \cdot \text{прискорення}$

$$g \cdot \frac{m}{s^2} = -Kg \cdot \frac{m}{s^2} \gg \frac{ML}{T^2}.$$

Розділивши рівняння (2.14) на обидві частини на $A_{pg}H_0U_0$, прискорення нормалізується і набуває вигляду

$$\frac{LU_0}{a_g H_0} \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta U}{U_0} \right) = -\frac{\Delta H}{H_0}.$$

Або

$$T_w \frac{d\Delta \bar{U}}{dt} = -\Delta \bar{H}. \quad (2.18)$$

Рівняння (2.18) показує, що якщо в положенні шлюза в кінці плунжера є протитиск, то вода в плунжері втрачає енергію і починає сповільнюватися.

Де

$$T_w = \frac{LU_0}{a_g H_0}, \quad (3.19)$$

T_w - час початку руху води, це час, який необхідний для того, щоб гідравлічний тиск під дією напору H_0 зрушив воду в шлюзі зі статичного положення. Значення становить від 0,5 с до 4,0 с при повному навантаженні.

Підставивши ΔH з рівняння (2.11)

$$T_w \frac{d\Delta \bar{U}}{dt} = 2 \Delta \bar{G} - \Delta \bar{U}. \quad (2.20)$$

Заміна $\frac{d}{dt}$ на оператор Лапласа s

$$T_w s \Delta \bar{U} = 2 \Delta \bar{G} - \Delta \bar{U} ,$$

$$\Delta \bar{U} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} T_w s} \Delta \bar{G} , \quad (2.21)$$

Підставимо $\Delta \bar{U}$ з рівняння (2.15)

$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}} = \frac{1 - T_w s}{1 + \frac{1}{2} T_w s} . \quad (2.22)$$

Рівняння (2.22) є передаточною функцією гідравлічної турбіни, яка показує, як змінюється вихідна потужність турбіни при відкритті шлюзу, і це у випадку ідеальної турбіни без втрат.

Неідеальна модель турбіни

Ідеальна модель турбіни використовується при малих сигналах турбіни і дає уявлення про основні принципи роботи гідравлічної системи. Раніше дослідження стабільності представлення турбіни ґрунтувалися на передаточній функції, представленій рівнянням (2.21) вище, але таке представлення має проблеми, коли вихідна потужність і частота значно змінюються. Неідеальна модель використовується в моделюванні в часовій області, де є великий сигнал. Припущення для цієї моделі полягає в тому, що є необмежені головна і хвостова частини, трубопровід є жорстким, а рідина нестисливою.

Швидкість води в штоку задається формулою,

$$U = K_u G \sqrt{H} , \quad (2.23)$$

$$P_m = K_p H U , \quad (2.24)$$

Об'ємна витрата води в плунжері визначається за формулою,

$$Q = A U . \quad (2.25)$$

Швидкість зміни швидкості води в плунжері визначається за формулою,

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{g}{L} H - H_0, \quad (2.26)$$

де A - площа труби;

U - швидкість води;

G - ідеальне положення шлюзу;

L - довжина трубопроводу

H, H_0 - гідравлічний напір на шлюзі та його початкове стаціонарне значення відповідно;

Q - об'ємна витрата;

g - гравітаційне прискорення;

t - час в секундах.

Основна увага приділяється великим потужностям сигналу, тому рівняння (2.23) та (2.24) нормалізуються на основі номінальних значень і набувають вигляду

$$\frac{U}{U_r} = \frac{G}{G_r} \left(\frac{H}{H_r} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.27)$$

$$\frac{P}{P_r} = \frac{U}{U_r} \left(\frac{H}{H_r} \right), \quad (2.28)$$

«г» вказує на номінальні значення в одиницях виміру, до яких перетворюються рівняння

$$\bar{U} = \bar{G} \bar{H}^{\frac{1}{2}}, \quad (2.29)$$

$$\bar{P} = \bar{U} \bar{H}, \quad (2.30)$$

Зробимо $\bar{H}$ предметом формули з рівняння (2.28)

$$\bar{H} = \left(\frac{\bar{U}}{\bar{G}} \right)^2. \quad (2.31)$$

Форма рівняння (2.26) в розрахунку на одиницю речовини

$$\frac{dU}{dt} \left(\frac{U}{U_r} \right) = -\frac{g}{L} \frac{H_r}{U_r} \left(\frac{H}{H_r} - \frac{H_0}{H_r} \right). \quad (2.32)$$

Або

$$\frac{d\bar{U}}{dt} = -\frac{1}{T_w} \bar{H} - \bar{H}_0, \quad (2.33)$$

У записі Лапласа

$$\frac{\bar{U}}{\bar{H} - \bar{H}_0} = -\frac{1}{T_w s}, \quad (2.34)$$

T_w - це час пуску води при номінальному навантаженні з фіксованим значенням для турбоагрегату і визначається за формулою

$$T_w = \frac{LU_r}{H_r g} = \frac{LQ_r}{gAH_r}. \quad (2.35)$$

Механічна потужність дорівнює

$$P_m = P - P_L. \quad (2.36)$$

де P_L - втрати потужності турбіни на тертя

$$P_L = U_{NL} H \quad (2.37)$$

U_{NL} - швидкість води без навантаження рівняння (2.35) в нормалізованій формі дає

$$\bar{P}_m = \bar{U} - \bar{U}_{NL} \bar{H}. \quad (2.38)$$

Рівняння (2.38) представляє питоме значення вихідної потужності турбіни на базі, що дорівнює номінальній потужності турбіни в МВт. В енергосистемах бажано представляти вихідну потужність і механічний крутний момент турбіни на базі номінальної потужності генератора в МВА або на загальній базі в МВА, і це дає

$$\bar{T}_m = \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right) \bar{P}_m \left(\frac{P_r}{MVA_{base}} \right) = \frac{1}{\bar{\omega}} \bar{U} - \bar{U}_{NL} \bar{H} \bar{P}_r, \quad (2.39)$$

де ω - одинична швидкість;

MVA_{base} - базова номінальна потужність, на основі якої розраховується крутний момент турбіни на одиницю;

P_r - номінальна потужність турбіни на одиницю.

Зміна від без навантаження до повного навантаження без втрат і з коефіцієнтом 1 на одиницю є ідеальним відкриттям шлюзу, тоді як в реальному відкритті шлюзу це зміна від повністю закритого положення до повністю відкритого з коефіцієнтом 1 на одиницю.

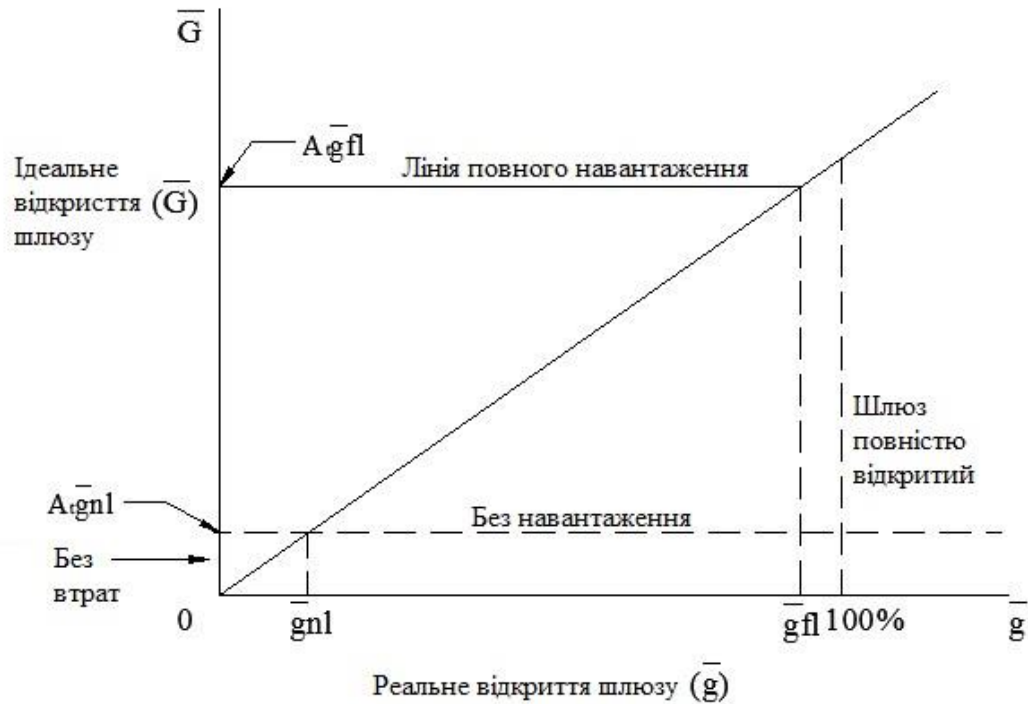


Рисунок 2.6 - Співвідношення між реальним та ідеальним відкриттям шлюзу

Це співвідношення характеризується наступною формулою

$$\bar{G} = A_t \bar{g} , \quad (2.40)$$

де A_t - коефіцієнт підсилення турбіни

$$A_t = \frac{1}{\bar{g}_{FL} - \bar{g}_{NL}} . \quad (2.41)$$

При моделюванні гідравлічної турбіни приймаються наступні припущення:

- лопатка турбіни вважається гладкою;
- гідроударом нехтуємо;

- рідини є стисливими, що визначається модулем об'ємного тиску, який є стрибком тиску при зменшенні об'єму, але він не враховується, отже, рідина (вода) вважається нестисливою;
- швидкість води пропорційна відкриттю шлюза;
- вихідна потужність залежить від гідравлічного напору і швидкості води.

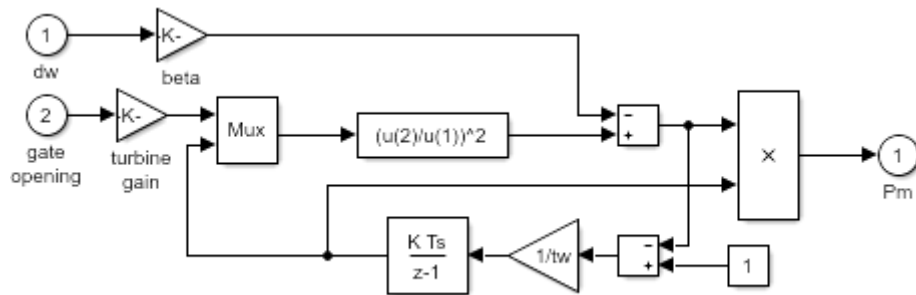


Рисунок 2.7 - Гідравлічна турбіна в Matlab/Simulink

$$P_m = A_t H (Q - Q_{NL}) , \quad (2.42)$$

де P_m - механічна потужність на валу;

Q - об'ємна витрата;

Q_{nl} - об'ємна витрата без навантаження.

$$Q = G \sqrt{H} , \quad (2.43)$$

де G - це відкриття шлюза (рад);

H - чистий напір (м).

Система збудження генератора

Основною функцією системи збудження є подача постійного струму на обмотки збудження синхронного генератора. Регулювання напруги та потоку реактивної потужності є одними з функцій керування збудника, які сприяють підвищенню стабільності системи. Захисна функція збудження полягає в тому, щоб забезпечити, щоб відповідна напруга і потік реактивної потужності не перевищували межі можливостей синхронної машини, системи збудження та іншого обладнання.

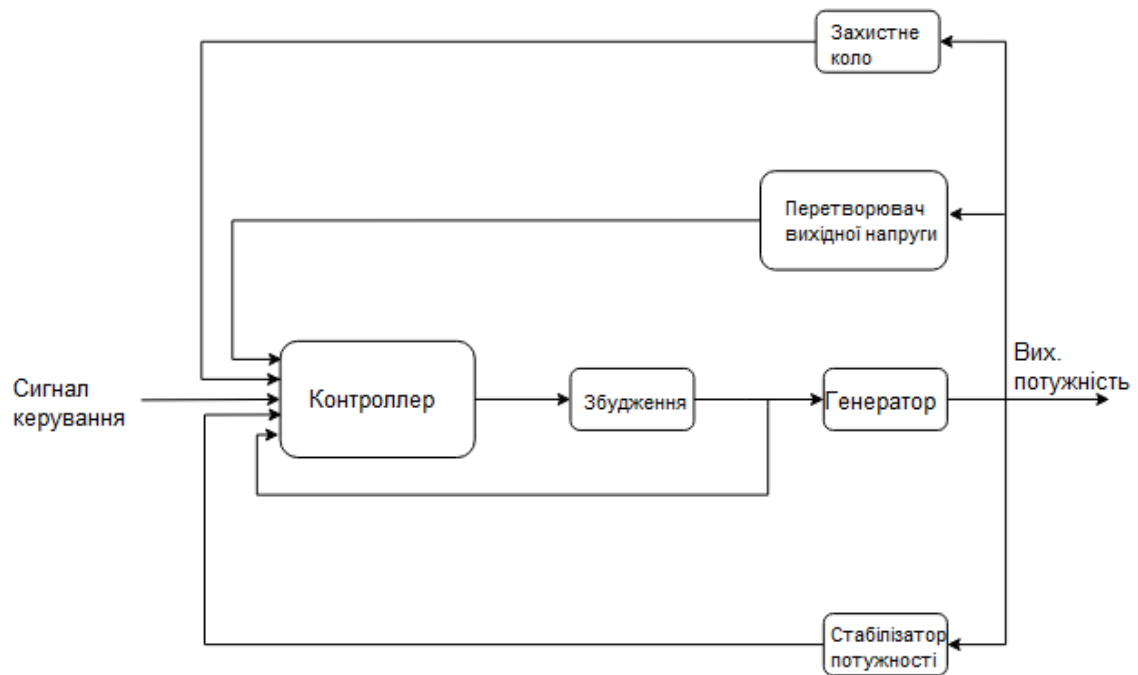


Рисунок 2.8 - Блок-схема збудження

2.5 Структура запропонованої системи мікромережі

Система складається з двох джерел живлення - фотоелектричних модулів, МГЕС та акумуляторних батарей в якості резервної системи, як показано на рисунку 2.9. Система акумуляторних батарей або поглинає надлишкову енергію, або розподіляє її, коли джерела енергії виробляють менше. Фотоелектрична система забезпечує близько 102,4 кВт і складається з підвищувального перетворювача постійного струму з відстеженням точки максимальної потужності (MPPT), що дозволяє витягувати максимальну потужність з масиву, і перетворювача джерела напруги. МГЕС складається з системи збудження, синхронного генератора, турбіни та регулятора і буде забезпечувати постійну потужність 90 кВт. Крім того, є випрямляч як інтерфейсний пристрій для інтеграції МГЕС, PV та акумуляторної батареї. Система підключена до навантаження змінного струму через перетворювач джерела напруги (ПДН). Інвертор використовує контур фазового автопідстроювання КФА для підтримки частоти і кута зсуву фаз напруги.

Схема керування складається з регуляторів напруги та струму з ПІ-регулюванням для покращення коефіцієнта потужності системи.

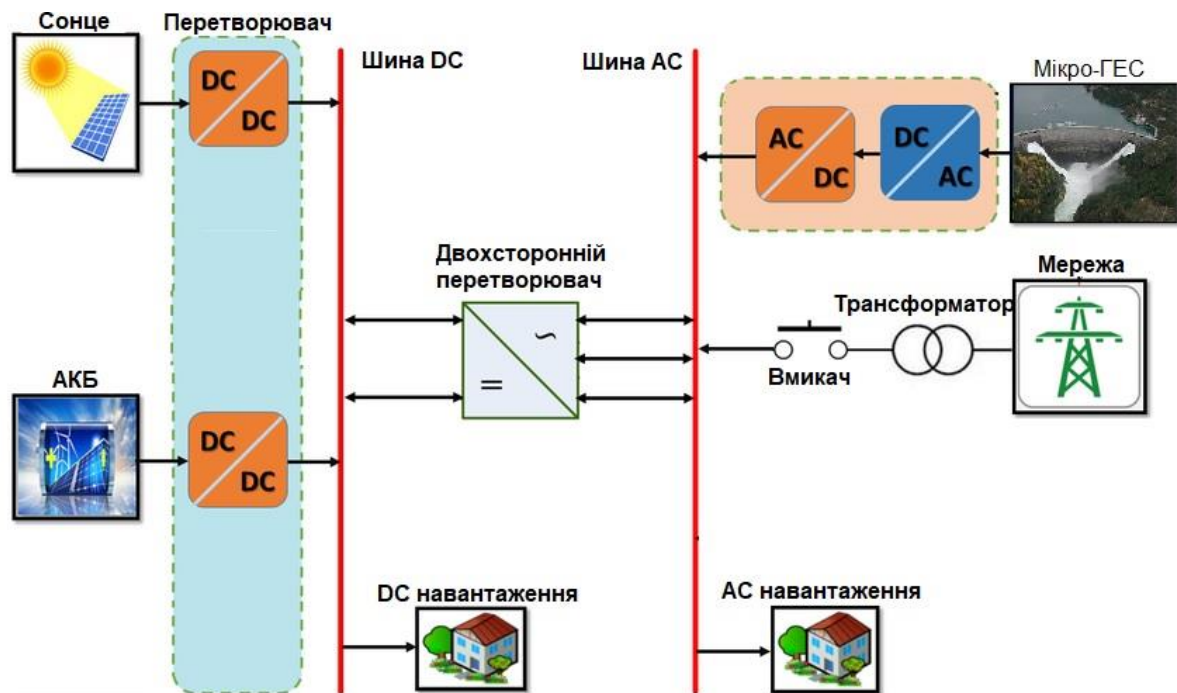


Рисунок 2.9 - Архітектура гібридної мікромережевої системи

LC-фільтри використовуються для придушення гармонік, вироблених інвертором. Фотоелектричні модулі є основним джерелом живлення системи, тому освітленість буде змінюватися, щоб імітувати реальні випадки. Літій-іонна акумуляторна батарея з двонаправленим перетворювачем використовується як резервна система для підтримки безперервного живлення навантаження і підтримки 750 вольт на шині постійного струму. Біполярні транзистори з ізолюваним шлюзом (IGBT) використовуються як комутаційні пристрої для підтримки напруги в ланці постійного струму. МГЕС виробляє постійну потужність з витратою $0,27 \text{ м}^3/\text{с}$ і гідравлічним напором 45 м.

Відповідно до IEC/ISO62264, який є міжнародним стандартом для зв'язку між постачальниками та виробниками, мікромережа повинна бути адаптована до цього стандарту. Існує чотири рівні контролю: внутрішній контур контролю, первинний контроль, вторинний контроль і третинний контроль. У цій системі використовуються два види контролю: внутрішній контроль і первинний

контроль. Внутрішній контур керування використовує силові електронні пристрої, такі як ПДН, для керування частотою та напругою всередині мікромережі. У первинному контурі керування система зберігання керується двонаправленим перетворювачем на основі коливань напруги за допомогою ПП-регулятора.

2.6 Модель фотоелектричного елемента

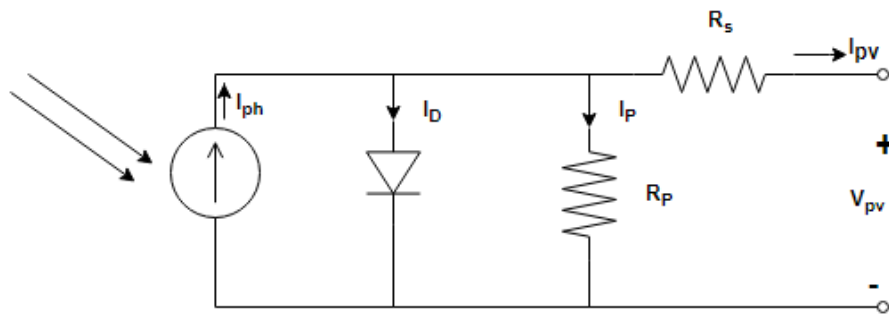


Рисунок 2.10 - Еквівалентна схема фотоелемента

На рисунку 2.10 вище, вольт-амперна характеристика фотоелемента представлена як:

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left(\frac{V + IR_s}{A} \right) - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} . \quad (2.44)$$

$$A = \frac{mkT_c}{q} . \quad (2.45)$$

Опір шунта набагато більший за опір послідовного кола, тому вираз $\frac{V + IR_s}{R_{sh}}$ у рівнянні (2.44) є незначним, отже, рівняння (2.46)

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left(\frac{V + IR_s}{A} \right) - 1 \right\} . \quad (2.46)$$

Фотострум I_{ph} залежить від робочої температури сонячного елемента і сонячного випромінювання і визначається на основі рівняння (2.47)

$$I_{ph} = \frac{I_{sc} + K_i T_c - T_{ref}}{1000} \lambda . \quad (2.47)$$

Струм насичення елемента визначається за формулою:

$$I_s = I_{RS} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right) \exp \left(\frac{qE \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right)}{KA} \right). \quad (2.48)$$

Сонячний елемент розраховується на основі наступних параметрів:

- напруга холостого ходу, V_{oc} : це максимальна напруга від сонячного елемента;
- струм короткого замикання: це найбільший струм, що генерується сонячним елементом при $V=0$;
- напруга елемента при відсутності світла визначається за формулою:

$$V_{oc} = \frac{mkT_c}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_o} \right) = A \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_o} \right), \quad (2.49)$$

де T_c - абсолютна температура елемента;

A - теплова напруга;

m - коефіцієнт ідеальності;

k - стала Больцмана;

T_c - температура елемента;

V - напруга;

q - електричний заряд.

2.7 Розрахунок необхідної потужності фотоелектричної системи

Сонячний елемент складається з напівпровідникового матеріалу, який може перетворювати сонячне випромінювання в електричну енергію. Вихідна потужність фотоелектричної батареї також залежить від температури та випромінювання сонячного елемента. Напруга і струм на виході залежать від декількох елементів, які з'єднані послідовно і паралельно. Фотоелектричний масив моделюється з використанням параметрів, наведених у таблиці 2.1 нижче, які відповідають даним 1 панелі Soltech-1STH-230-P. Робочі температури становлять 25 і 50°C, а потужність випромінювання - 1000 Вт на

м², графік залежності струму від напруги і напруги від потужності показано на рисунку 2.11, який наведено нижче. Потужність фотоелектричного масиву становить 102,47 кВт, що досягається за рахунок 28 паралельних і 16 послідовних модулів.

Таблиця 2.1 - Технічні дані фотоелектричного модуля (1 Soltech-1STH-230-P)

V_{oc} (В)	37,1
I_{sc} (А)	8,18
V_{mp} (В)	29,9
I_{mp} (А)	7,65
R_s (Ом)	0,34833
R_p (Ом)	294,1335
I_{sat} (А)	$3,0478e^{-10}$
I_{ph} (А)	8,1897
n	1,0028

Таблиця 2.2 - Параметри фотоелектричних перетворювачів

Тип фотоелектричних елементів	1 Soltech-1STH-230-P
Комірки на модуль	60
Послідовно з'єднані струни	16
Паралельно з'єднані струни	28

Пікова потужність, необхідна кожному домогосподарству, становить 3396 Вт, а для забезпечення 50 домогосподарств пікова потужність повинна становити приблизно 170 кВт, не враховуючи втрати на передачу та інші втрати, які можуть бути втрачені через ККД використовуваних машин і приладів. Навантаження для цієї системи встановлено на рівні 180 кВт. Фотоелектрична станція буде спроектована для виробництва 100 кВт електроенергії.

Таблиця 2.3 - Енергоспоживання основних побутових приладів

Елемент	Номинальна потужність (Вт)	Щоденне вживання (год)	Використані дні	Щомісячне споживання енергії (кВт·год)
Зарядка для телефону	11	5,0	30	1,7
Телебачення	35	6,0	30	7
Праска	1000	4,0	6	24
Чайник	1000	0,5	30	15
Варильна поверхня	1000	1,0	25	25
Освітлення	100	5	30	15
Холодильник (20 л)	250	6,5	30	49

Кількість послідовно з'єднаних панелей визначається шляхом ділення очікуваної вихідної напруги на напругу в точці максимальної потужності (V_{mp}) панелі $\frac{450}{29,9} = 15,05$. Число округляється в більшу сторону, щоб отримати 16 послідовно з'єднаних панелей.

Вихідний струм розраховується на основі потужності, яка приймається від масиву, поділеної на напругу, вироблену фотоелектричним масивом, що становить $16 \cdot 29,9 = 478,40V_{dc}$

$$P = IV \quad (2.50)$$

$$I = \frac{100 \cdot 10^3}{478,4} = 209,03A.$$

Кількість паралельно з'єднаних панелей отримуємо шляхом ділення вихідного струму на струм при максимальній потужності

$$I_{mp} = \frac{209,03}{7,65} = 27,32.$$

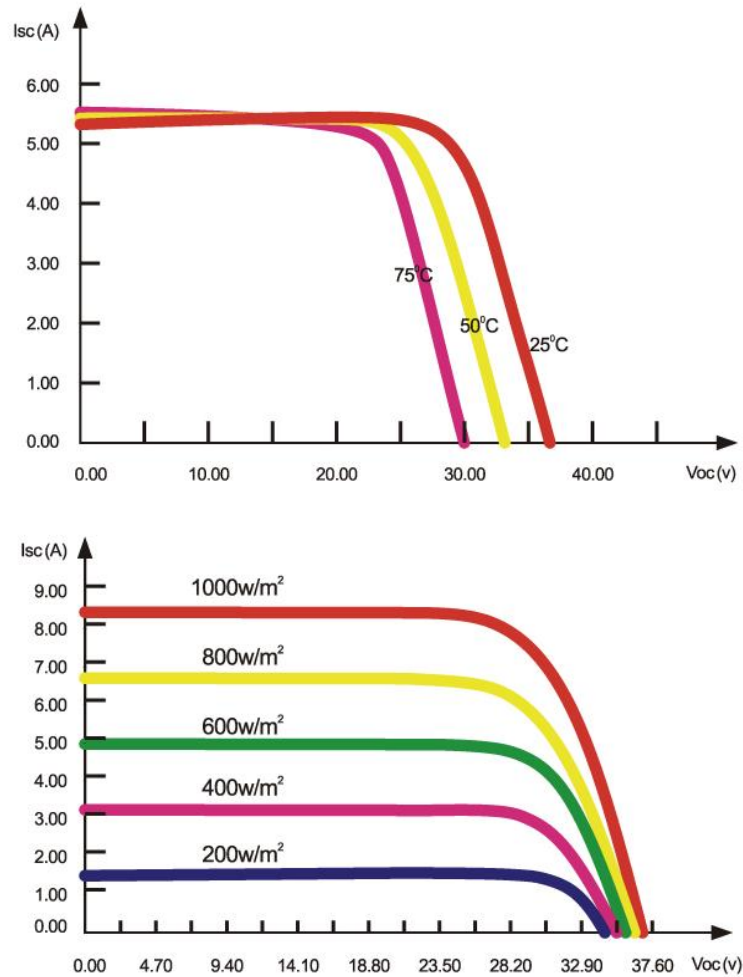


Рисунок 2.11 - Характеристики фотоелектричних модулів

Використовується той самий принцип округлення в більшу сторону, оскільки неможливо мати частину панелі, отже, 28 паралельно з'єднаних панелей.

Загальна вироблена потужність буде такою:

$$P_o = 28 \cdot 7,65 \cdot 16 \cdot 29,9 = 102,47,$$

$$C_{DLink} = \frac{V_{pv} D}{\Delta V_{pv} f_s^2 L_{boost}}, \quad (2.51)$$

$$C_{DLink} = \frac{0,362 \cdot 478,4}{4 \cdot 44,31 \cdot 5 \cdot 10^3} = 70,76 \cdot 10^{-6}.$$

Цей конденсатор призначений для мінімізації пульсацій напруги на фотоелектричних клемах.

2.8 Розрахунок DC-DC перетворювача

DC-DC перетворювачі це електричні кола, які відіграють ключову роль у передачі енергії для забезпечення напруги, відмінної від напруги живлення. Вони використовуються для підтримання необхідної напруги в межах необхідних специфікацій. Існує кілька типів DC-DC перетворювачів, а саме: підвищувальний, підвищувальний, підвищувально-знижувальний, повномостовий та сик-перетворювачі, але підвищувальний та підвищувальний перетворювачі мають базову топологію всіх перетворювачів, решта є модифікаціями цих двох. У конструкціях DC-DC перетворювачів використовується імпульсний регулятор через його високу ефективність і можливості порівняно з лінійними перетворювачами. Використання широтно-імпульсної модуляції є кращим, оскільки вона підтримує як частоту перемикавання, так і змінює робочий цикл для отримання необхідних напруг.

Щоб підтримувати бажану вихідну напругу DC-DC перетворювача, необхідно контролювати час увімкнення і вимкнення та підтримувати постійну частоту. Цей метод відомий як широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), яка підтримує частоту перемикавання. Це досягається шляхом генерування постійної напруги у вигляді імпульсів, які мають різну ширину по відношенню до ділянок з більшою амплітудою. Ширина вказується шляхом зміни часу увімкнення відносно періоду перемикавання..

Підвищувальний перетворювач

У прагненні підвищити напругу від джерела напруги до більш високої напруги використовується підвищувальний перетворювач. До складу підвищувального перетворювача входять котушка індуктивності, конденсатор, діод і ШІМ. Розмір котушки індуктивності L і конденсатора визначається необхідними вихідними напругою і струмом. Конденсатор повинен забезпечити безперервну подачу необхідної напруги, в той час як діод запобігає зворотному потоку струму назад до джерела. Визначення моменту увімкнення або вимкнення перемикача здійснюється ШІМ-контролером шляхом визначення

високої або низької напруги. Коли на шлюзі схеми присутня висока напруга, силовий транзистор буде увімкнений, а коли низька - вимкнений [3].

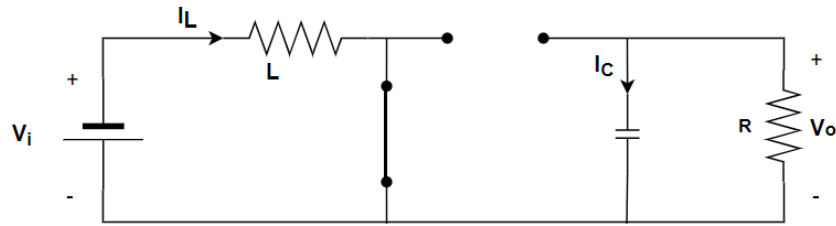


Рисунок 2.12 - Схема увімкнення перемикача підвищувального перетворювача

Коли перемикач увімкнено, як показано на рисунку 2.12, індуктор заряджається і струм I_L збільшується за лінійною залежністю, а конденсатор розряджається, подаючи струм на навантаження.

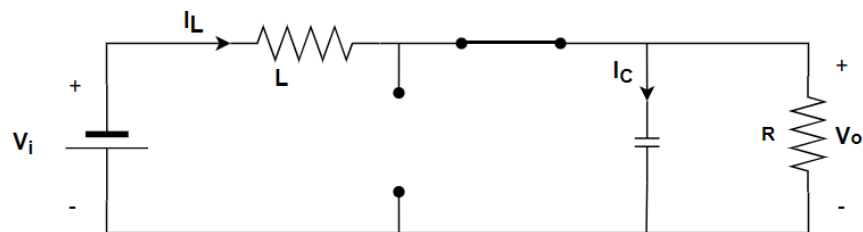


Рисунок 2.13 - Схема вимикання підвищувального перетворювача

Коли вимикач вимикається, енергія, накопичена у вигляді магнітного поля, реалізується, струм I_L протікає через діод, а індуктор живить навантаження і одночасно заряджає конденсатор.

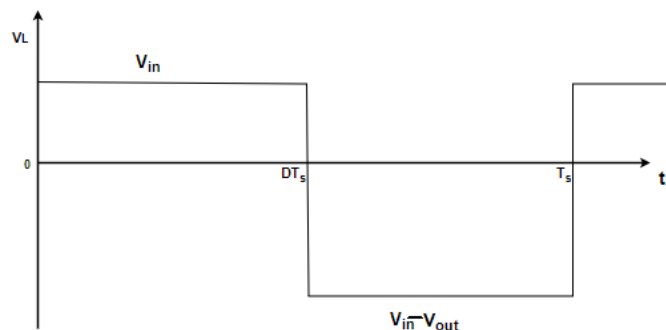


Рисунок 2.14 - Напруга індуктора

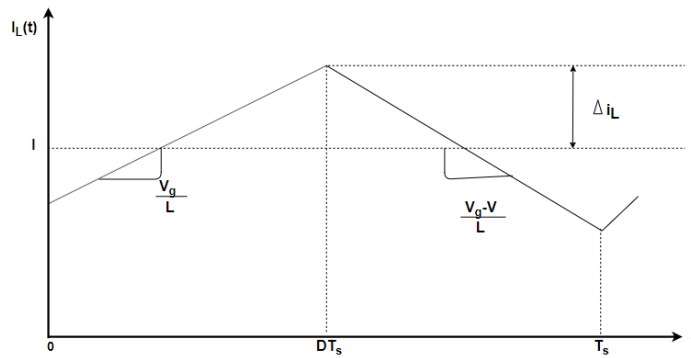


Рисунок 2.15 Форма пульсацій струму котушки індуктивності

$$\Delta i_L = \frac{V_i}{L} DT = -\frac{V_i - V_o}{L} (1 - D) T, \quad (2.52)$$

$$V_i D = -V_i + V_o (1 - D), \quad (2.53)$$

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}, \quad (2.54)$$

$$D = 1 - \frac{478,40}{750} = 0,36, \quad (2.55)$$

$$L = \frac{V_i D}{\Delta I_i f_s}, \quad (2.56)$$

де D - робочий цикл;

V_i - напруга від фотоелектричної батареї;

ΔI_i - струм пульсацій індуктора, який становить 30% від струму навантаження (I_L);

f_s - частота перемикання.

$$I_L = \frac{P_{in}}{V_{in}} = \frac{100 \cdot 10^3}{478,4} = 209,03, \quad (2.57)$$

$$\Delta I = 0,3 \cdot 209,03 = 62,71, \quad (2.58)$$

$$L = \frac{478,4 \cdot 0,362}{62,71 \cdot 5 \cdot 10^3} = 552,32. \quad (2.59)$$

Значення ємності конденсатора задається формулою

$$C_{DC} = \frac{I_o D}{\Delta V_o f_s}, \quad (2.60)$$

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{102,47 \cdot 10^3}{750} = 136,63, \quad (2.61)$$

$$C_{DC} = \frac{136,63 \cdot 0,362}{5 \cdot 10^3 \cdot 7,5} = 1,32, \quad (2.62)$$

де ΔV_o - напруга пульсацій і становить 1% від бажаної напруги після підвищення, а I_o - вихідний струм. Цей конденсатор зберігає надлишкову енергію, коли є більше потужності, і віддає її в періоди, коли її недостатньо для підтримки потоку потужності конденсатора.

2.9 Імітаційна модель інвертора (DC-AC)

Інвертор, що використовується, являє собою біполярний транзистор з ізольованим шлюзом для перетворення постійного струму від сонячної фотоелектричної батареї, яка була підсилена, і МГЕС в змінний струм. Універсальний міст, що використовується, функціонує на трьох рівнях, трифазного типу ПДН.

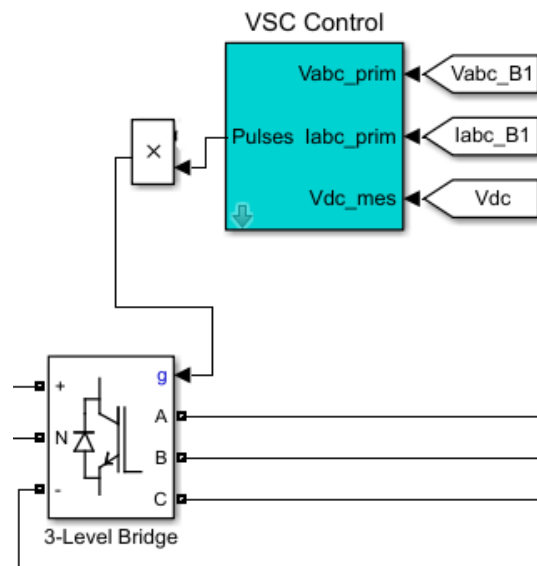


Рисунок 2.16 - Інвертор постійного струму - змінного струму з керуванням ПДН

Коли фотоелектрична система або джерело постійного струму підключені до мережі або до трифазного джерела, що працює на певній напрузі і частоті,

виникає потреба в управлінні інвертором для синхронізації вихідної потужності постійного струму з вихідною потужністю трифазного джерела. Струм і напруга з координат abc на передавальній стороні трансформатора вимірюються і проходять через петлю фазового автопідстроювання (ПФА). Петля фазового автопідстроювання - це система зі зворотним зв'язком, яка складається з фазового детектора, генератора, керованого напругою, і фільтра. Фазовий детектор порівнює різницю фаз вхідного опорного сигналу і вихідного сигналу від генератора, щоб створити помилку, пропорційну різниці фаз. Система зворотного зв'язку блокує вхідний і вихідний сигнали таким чином, щоб різниця фаз залишалася незмінною, і це призводить до однакової частоти. ПФА з прив'язкою до мережі використовується перетворювачами потужності для синхронізації, використовуючи напругу, частоту і фазу мережі як базову лінію і підлаштовуючись під частоту мережі. Кут зсуву фаз і трифазні параметри перетворюються на двофазні параметри з кадру abc в кадр dq , який називається синхронним кадром. Вони проходять через регулятор струму для досягнення максимальної потужності, що подається в мережу або трифазну систему [3].

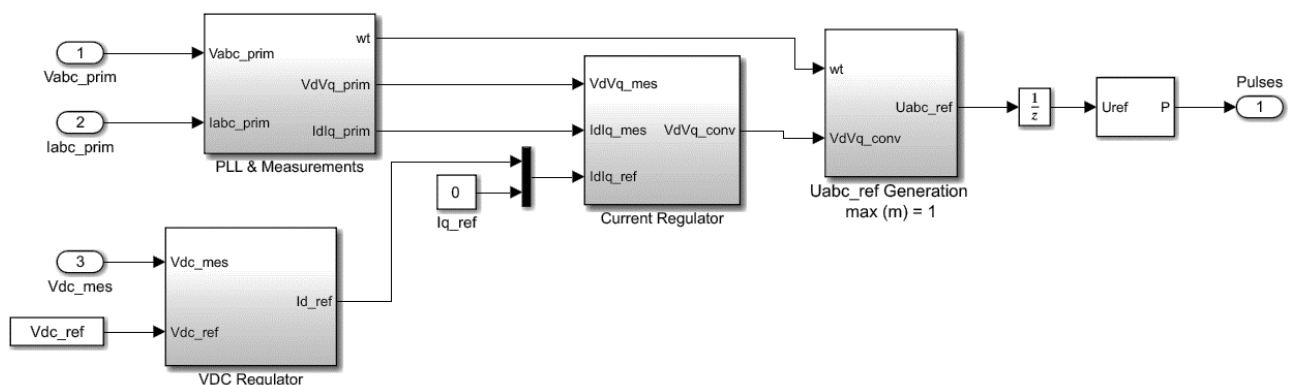


Рисунок 2.17 - Керування перетворювачем джерела напруги

На рисунку 2.17 вище зображено ПДН з ПФА, який допомагає підтримувати частоту на необхідному рівні та фазовий кут напруги. Управління включає регулятори напруги та струму для забезпечення хорошого коефіцієнта потужності. Регулятор постійної напруги перетворює постійну напругу через ПІ-регулятор, який виробляє струм I_d^* , порівнюючи постійну напругу з

опорною постійною напругою. I_q та I_d генеруються ПІ-контролерами від регулятора струму. I_q^* дорівнює нулю для покращення коефіцієнта потужності інвертора. Зміна сигналу I_d уточнюється для зменшення похибки ПІ-регулятором і генерує сигнал V_d для порівняння з ωt , щоб отримати V_d^* .

Зміна I_q також уточнюється ПІ-регулятором для отримання V_q і порівняння з ωt для отримання V_q^* . Блок Uabc представляє кадр dq0 для генерації ШІМ.

2.10 Розрахунок вихідного фільтра

Живлення постійного струму, яке подається на навантаження, здійснюється через інвертор джерела напруги (ІДН). Напруга на виході інвертора має гармоніки, отже, їх необхідно зменшити за допомогою фільтрів між навантаженням і ІДН для забезпечення гарної якості електроенергії.

L-фільтр

Ступінь зменшення вмісту гармонік визначається використанням фільтром. Це фільтр першого порядку, який включає одну котушку індуктивності послідовно з мережею. L-фільтр є найпоширенішим фільтром через простоту виготовлення і відсутність резонансних ускладнень, які спостерігаються у фільтрах другого і третього порядку. Його основна мета - пом'якшити пульсації струму, що виникають при перемиканні інвертора. Він більш ефективний при використанні з інвертором з високою модуляцією перемикання, він може зменшити пульсації на 20 дБ за декаду в усьому діапазоні частот. Індуктивність L_f розраховується за допомогою рівняння (2.63), коли напруга постійного струму становить 750 В, частота перемикання 5 кГц, а струм пульсацій індуктивності становить 20% від максимального вихідного струму від піку до піку.

$$L_f = \frac{V_{dc}}{4\Delta i f_s},$$

$$I = \frac{P}{V_{dc}} = \frac{102,47 \cdot 10^3}{750} = 136,63 \quad (2.63)$$

$$f_s = 0,2 \cdot 136,63 = 27,33,$$

$$L_f = \frac{750}{4 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 27,33} = 1,37.$$

LC-фільтр

У фільтрах високих порядків для зменшення гармонік використовуються як котушки індуктивності, так і конденсатори, але конфігурація стає складнішою. LC-фільтр - це фільтр другого порядку, який зазвичай використовується в мікромережах, що працюють в ізольованому режимі. LC-фільтр рідко використовується в мікромережі, підключеній до мережі, оскільки його резонансна частота змінюється в залежності від значення індуктивності мережі [3]. Синусоїдальна напруга з невеликим загальним коефіцієнтом гармонік, максимальна напруга пульсацій становить 1% від максимальної вихідної напруги від піку до піку, тому розмір конденсатора C_f визначається за формулою:

$$C_f = \frac{\Delta i}{8 f_s \Delta V_o}, \quad (2.64)$$

$$\Delta V_o = 0,01 \cdot 750 = 7,50,$$

$$C_f = \frac{27,33}{8 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 7,5} = 91,10.$$

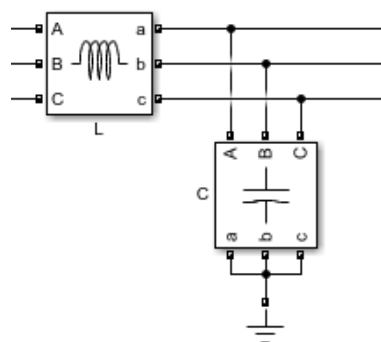


Рисунок 2.18 - LC-фільтр в Simulink

2.11 Мікро-ГЕС та розрахунок її потужності

Моделювання МГЕС вимагає стаціонарної ініціалізації, що було виконано за допомогою опції машинної ініціалізації в блоці `powergui`, яка вирішує потік навантаження та оновлює фази напруг і струмів енергосистеми. Синхронний генератор розпізнається в `powergui` як генератор коливань, отже, активна потужність і напруга на затискачах є зазначеними. Саме під час цього процесу ініціалізації синхронного генератора `powergui` також ініціалізує гідравлічну турбіну та оновлює адекватне збудження поля, необхідне генератору, відповідно до потоку навантаження.

Система збудження генератора визначає вихідне значення напруги та реактивної потужності, регулюючи таким чином вихідну енергію генератора і визначаючи стабільність роботи всієї установки. У випадку, коли частота обертання ротора підтримується для забезпечення необхідної частоти між 49,5 Гц і 50,5 Гц, автоматичний регулятор напруги (АРН) в системі збудження контролює величину напруги на затискачах і реактивну потужність на виході машини, що забезпечує стабільність системи.

Гідравлічна турбіна

Невідповідність потужності, що подається турбіною на генератор, і потужності, що споживається навантаженням від генератора, призводить або до прискорення ротора синхронного генератора, або до уповільнення, в залежності від типу коливань. Якщо генерується більше енергії, ніж потрібно навантаженню, виникає невідповідність між механічним і електромагнітним моментом, що діє на ротор, що призводить до прискорення ротора, і навпаки. Дуже важливо підтримувати баланс потужності за допомогою регулювання частоти навантаження.

Регулювання частоти навантаження здійснюється за допомогою електричних серводвигунів синхронного генератора, який використовується для підтримки частоти системи в межах заданих параметрів при коливаннях навантаження.

$$V_1 = \sqrt{2gH} \quad , \quad (2.65)$$

де G - гравітаційне прискорення;
 H - манометричний напір на соплі;
 V_1 - швидкість від струменя.

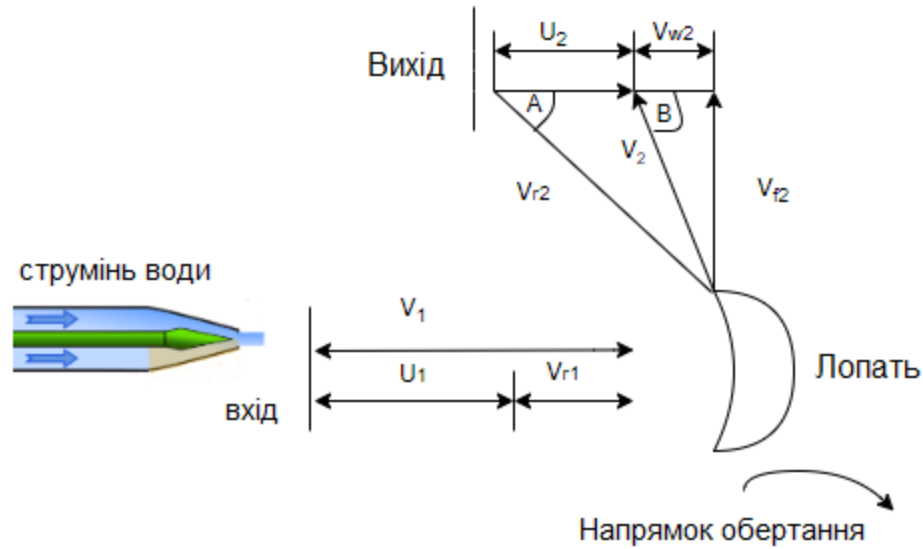


Рисунок 2.20 - Трикутник швидкостей колеса Пелтона

Тангенціальна швидкість на вході задається формулою:

$$V_1 = V_{w1} = V_{r1} + U_1 \quad , \quad (2.65)$$

де V_1 - абсолютна швидкість рідини на вході (м/с);
 V_{r1} - відносна швидкість на вході (м/с);
 U_1 - тангенціальна швидкість лопаті (м/с);
 V_2 - абсолютна швидкість рідини на виході (м/с);
 V_{r2} - відносна швидкість на виході (м/с);
 V_{w2} - відносна швидкість на виході (м/с);
 U_2 - тангенціальна швидкість лопаті на виході (м/с);
 V_{f2} - швидкість потоку на виході (м/с);
 A - кут, утворений відносною швидкістю з рухом лопаті;
 B - кут, утворений абсолютною швидкістю з рухом лопаті.

Припущення:

- відсутність втрат на тертя при проходженні води через ківш $V_{w1} = V_{w2}$;
- кут A дорівнює нулю, $V_2 = V_{r2}$;
- ківш є однорідним $U_2 = U_1 = U$;

- співвідношення швидкостей дорівнює 0,5;
- коефіцієнт корисної дії генератора η_{gen} 95%.

Тангенціальна швидкість на вході задається формулою:

$$V_2 = U_1 - V_{w2} \cos B_2, \quad (2.66)$$

Зміна тангенціальної швидкості рідини використовується для визначення крутного моменту на валу та потужності, що генерується, і визначається за формулою:

$$V_2 - V_1 = V_{w1} (1 - \cos B_2) = V_1 - U (1 - \cos B_2). \quad (2.67)$$

Потужність - це відношення масової витрати води до швидкості ковша за рахунок зміни тангенціальної швидкості рідини на вході і виході.

$$P_{shaft} = \dot{m} U (V_1 - U (1 - \cos B_2)). \quad (2.68)$$

Замінивши масову витрату на об'ємну витрату і густину води, отримаємо потужність:

$$P_{shaft} = \rho Q U (V_1 - U (1 - \cos B_2)), \quad (2.69)$$

$$V_1 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 45} = 29,71.$$

Швидкість лопаті визначається за допомогою співвідношення швидкостей

$$\frac{U}{V} = 0,5 \gg \gg U = 29,71 \cdot 0,5 = 14,86. \quad (2.70)$$

Об'ємна витрата вважається рівною 0,27 м³/с, густина - 1000 кг/м³, кут лопаті на виході - 133,5°.

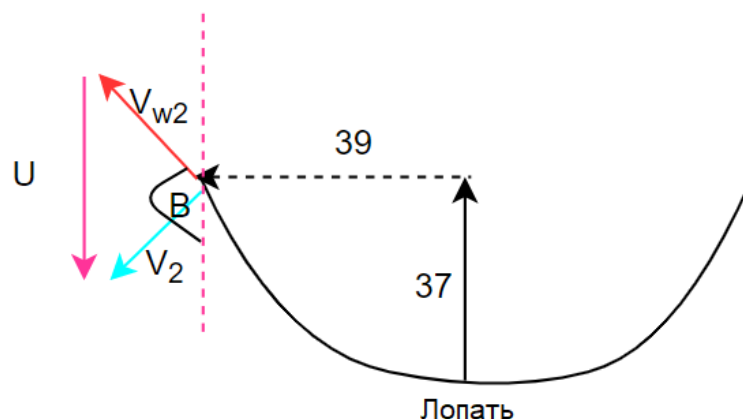


Рисунок 2.21 - Швидкості на виході з лопатки

$$B = 180 - \theta \gg \gg \theta = \tan^{-1} \left(\frac{39}{37} \right) = 46,5 \gg \gg 180 - 46,5 = 133,50.$$

$$P_{shaft} = 1000 \cdot 0,27 \cdot 14,86 \cdot 29,71 - 14,86 \cdot 1 - \cos 133,5 = 100,69.$$

$$\eta_h = \frac{P_{shaft}}{\rho g H Q} = \frac{100,69 \cdot 10^3}{1000 \cdot 9,81 \cdot 45 \cdot 0,27} = 84,60\%.$$

$$\eta_{overall} = \eta_h \cdot \eta_{gen} \gg \gg 0,846 \cdot 0,95 = 80,37\%.$$

Згенерована електрична потужність з урахуванням η_{gen} тоді стає

$$P_{electric} = 100,69 \cdot 0,95 = 95,66.$$

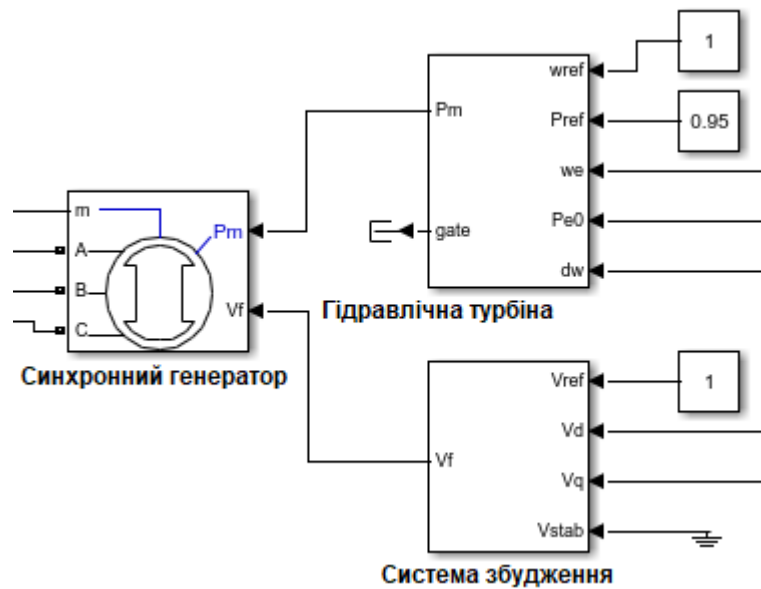


Рисунок 2.22 - Мікрогідросистема MATLA/SIMULINK на основі синхронної машини

2.12 Роль акумуляторної батареї в мікромережі

Альтернативні джерела енергії, такі як вітрові турбіни та сонячні фотоелектричні станції, мають проміжну генерацію через їх залежність від погодних умов. Існує необхідність пом'якшити цю залежність за допомогою систем зберігання. У цій дипломній роботі використовуються літій-іонні акумулятори для створення надійної гібридної системи завдяки їх високій енергоефективності, тривалому терміну служби, високій щільності потужності та високій надійності порівняно з іншими типами акумуляторів, такими як

свинцево-кислотні, нікель-кадмієві (NiCD) та нікель-металогідридні (NiMH) акумулятори. Система зберігання акумуляторів складатиметься з двох компонентів [22,23]: акумуляторної батареї та двонаправленого DC-DC (buck/boost) перетворювача з двома перемикачами для керування потоком енергії.

Перетворювач buck/boost допомагає узгоджувати напругу від акумуляторів з відновлюваним джерелом, він також контролює заряджання та розряджання акумуляторів. Акумулятори потрібно утримувати в належних умовах, запобігати надмірному розрядженню та зарядженню, щоб подовжити термін їхньої служби. Якщо цим умовам не запобігати, це призводить до зменшення ємності акумулятора. Потрібна система управління батареєю, яка контролює напругу, струм і температуру, щоб підтримувати стан батареї в належному стані, а також балансує заряд елементів, щоб підтримувати постійну напругу на елементах. Управління акумуляторною системою може здійснюватися за допомогою мікроконтролера, який контролює напругу і струм залежно від стану заряду (SOH) і температури навколишнього середовища.

2.13 Моделювання акумуляторної батареї та двонаправленого перетворювача

Акумуляторна батарея підключається на виході підвищувального перетворювача постійного струму від фотоелектричної батареї через двонаправлений перетворювач постійного струму, що дозволяє їй або поглинати надлишкову енергію, діючи як навантаження, або диспетчеризувати енергію і працювати як джерело напруги. Блок знаходиться в бібліотеці SimPowerSystems в Matlab і має три з'єднувальні клеми, дві з яких призначені для фізичних сигналів, а клемка «m» - для сигналів SOS, напруги та струму. Фізична клемка підключена до лінії постійного струму від фотоелектричної батареї. Коливання потужності як МГЕС, так і фотоелектричних панелей через

їхню переривчасту природу призводить до невідповідності між попитом і пропозицією, а отже, до потреби в акумуляторній батареї.

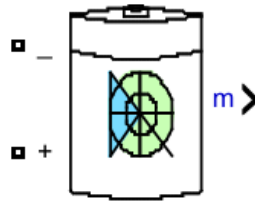


Рисунок 2.23 - Блок акумуляторної батареї

Модель заряджання та розряджання літій-іонної батареї описується наступними рівняннями [24].

Розряд:

$$V_{batt} = E_o - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + i^* + A \exp -B \cdot it . \quad (2.71)$$

Заряд:

$$V_{batt} = E_o - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0,1Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \exp -B \cdot it , \quad (2.72)$$

де V_{batt} - напруга батареї (В);

E_o - постійна напруга акумулятора (В);

K - константа поляризації (В/(А·год)) або поляризаційний опір (Ω);

Q - ємність акумулятора (А·год);

It - фактичний заряд акумулятора (А·год);

A - амплітуда експоненціальної зони (В);

B - постійна часу експоненціальної зони, зворотна (А·год)⁻¹;

R – внутрішній опір (Ω);

I - струм акумулятора (А);

i^* - струм фільтра (А);

$\exp$ - напруга експоненціальної зони (В).

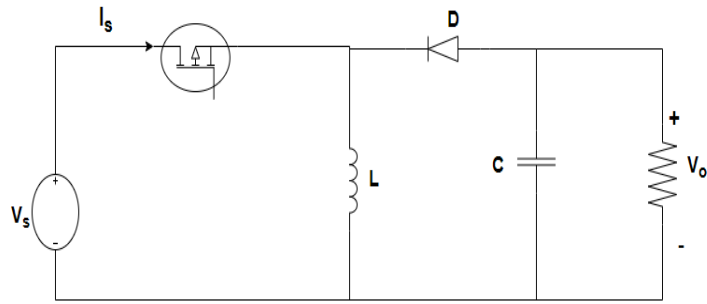


Рисунок 2.24 - Двонаправлений перетворювач

Є перемикачі та діод, який підключений у напрямку, протилежному потоку енергії від джерела, до конденсатора та навантаження, і вони з'єднані паралельно, як показано на рисунку 2.24 вище, і це допомагає потоку струму текти в одному напрямку. Перемикач вмикається і вимикається за допомогою ШІМ, яка може бути часовою або частотною.

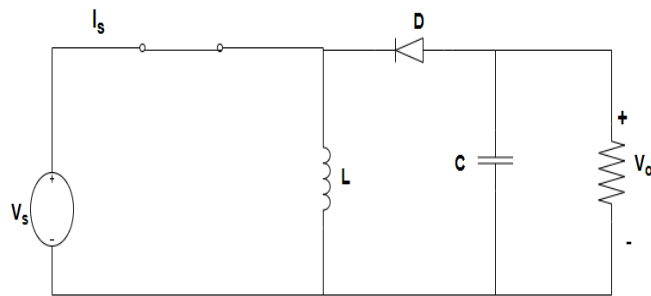


Рисунок 2.25 - Двонаправлений перетворювач з увімкненим перемикачем

Коли перемикач увімкнено, струм протікає через індуктор, а напруга на індукторі V_L дорівнює V_s , тому завдяки постійній напрузі струм індуктора лінійно збільшується, а індуктор накопичує заряд, в результаті чого індуктор має більше енергії.

Коли вимикач увімкнений, що визначається робочим циклом D , де $D = \frac{T_{ON}}{T}$ і T - період. Напруга джерела і напруга на котушці індуктивності рівні;

$$V_s = V_L = L \frac{di}{dt}. \quad (2.73)$$

Збільшення струму під час періоду увімкнення призводить до наступної швидкості зміни індуктивності котушки індуктивності;

$$\frac{\Delta i}{DT} = \frac{V_s}{L}, \quad (2.74)$$

$$\Delta i = \left(\frac{V_s}{L} \right) DT, \quad (2.75)$$

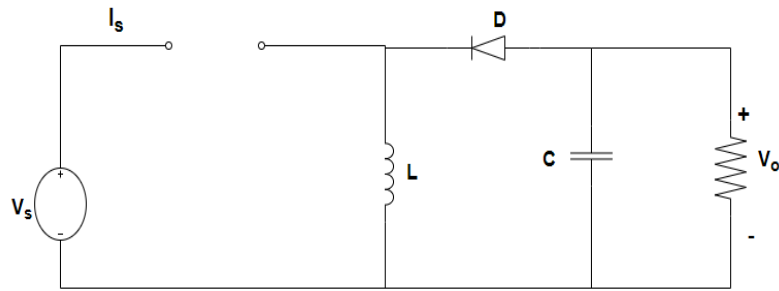


Рисунок 2.26 - Двонаправлений перетворювач з вимкненим перемикачем

Це стан ВИМКНЕНО, і в цьому випадку полярність котушки індуктивності змінюється на протилежну, а енергія, накопичена в котушці індуктивності, розсіюється в навантаженні, що призводить до підтримання струму в тому ж напрямку, що і вихідна напруга, оскільки котушка індуктивності тепер стала джерелом.

$$L_{\min} = \frac{D(1-D)^2 V_0}{2 \cdot f \cdot I_{ccm}}. \quad (2.76)$$

$$D = \frac{V_{Bat}}{V_0}, \quad (2.77)$$

де V_{Bat} - напруга батареї (низька сторона);

V_0 - напруга живлення (висока сторона).

$$D = \frac{400}{750} = 0,53, \quad (2.77)$$

де $L_{\min}$ - значення індуктивності;

D - робочий цикл (0,533);

I_{ccm} - 10% від I_{Load} ;

f - частота перемикання (50 кГц).

$$L_{\min} = \frac{0,533 \cdot 1 - 0,533^2 \cdot 750}{2 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 13,6} = 6,40 \cdot 10^{-5} \quad , \quad (2.76)$$

$$C_{Boost} = \frac{DI_{Load}}{f \cdot \Delta V_o} \quad , \quad (2.78)$$

де $\Delta V_o = 1\%$ від V_o ,

$$C_{Boost} = \frac{0,533 \cdot 136,6}{50 \cdot 10^3 \cdot 7,5} = 1,94 \cdot 10^{-4}.$$

Це силовий електронний регулятор постійного струму, який може підвищувати або знижувати напругу. У цій симуляції будуть використані IGBT-перемикачі, і цей перетворювач використовує напругу ланки постійного струму V_{dc} . Це потрібно для того, щоб мати постійну напругу ланки постійного струму. Коли напруга коливається, нестабільність напруги ланки постійного струму вимагає використання стабілізатора напруги. Вихідна напруга двонаправленого перетворювача залежить від здатності системи керування правильно визначати, чи потрібно знижувати або підвищувати напругу. Це допомагає підвищити ефективність і продуктивність системи.

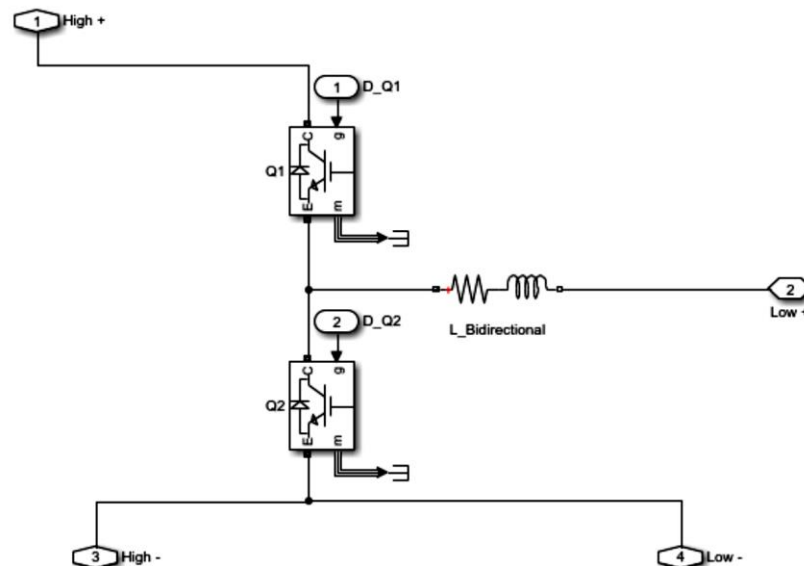


Рисунок 2.27 - Схема двонаправленого перетворювача для акумуляторної батареї

Двонаправлений DC_DC перетворювач акумулятора використовує два перемикачі, як показано на рисунку 2.27 вище. Основна мета - підтримувати

необхідну напругу, таким чином, буде активовано або підвищувальний, або понижувальний режим, і це залежить від схеми керування, показаної на рисунку 2.28.

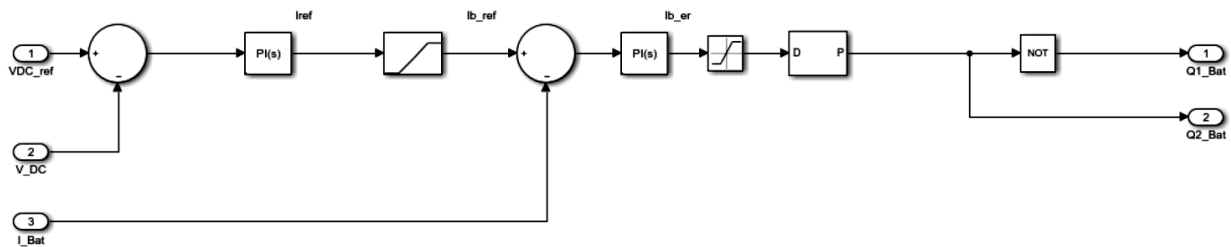


Рисунок 2.28 - Керування двонаправленим перетворювачем постійного струму від акумулятора

2.14 Алгоритм керування енергоспоживанням

Безперервний потік енергії має першочергове значення, отже, він вимагає наявності системного управління, яке визначає, коли зберігати енергію, коли є надлишок, і коли відправляти її зі сховища, коли виникає дефіцит.

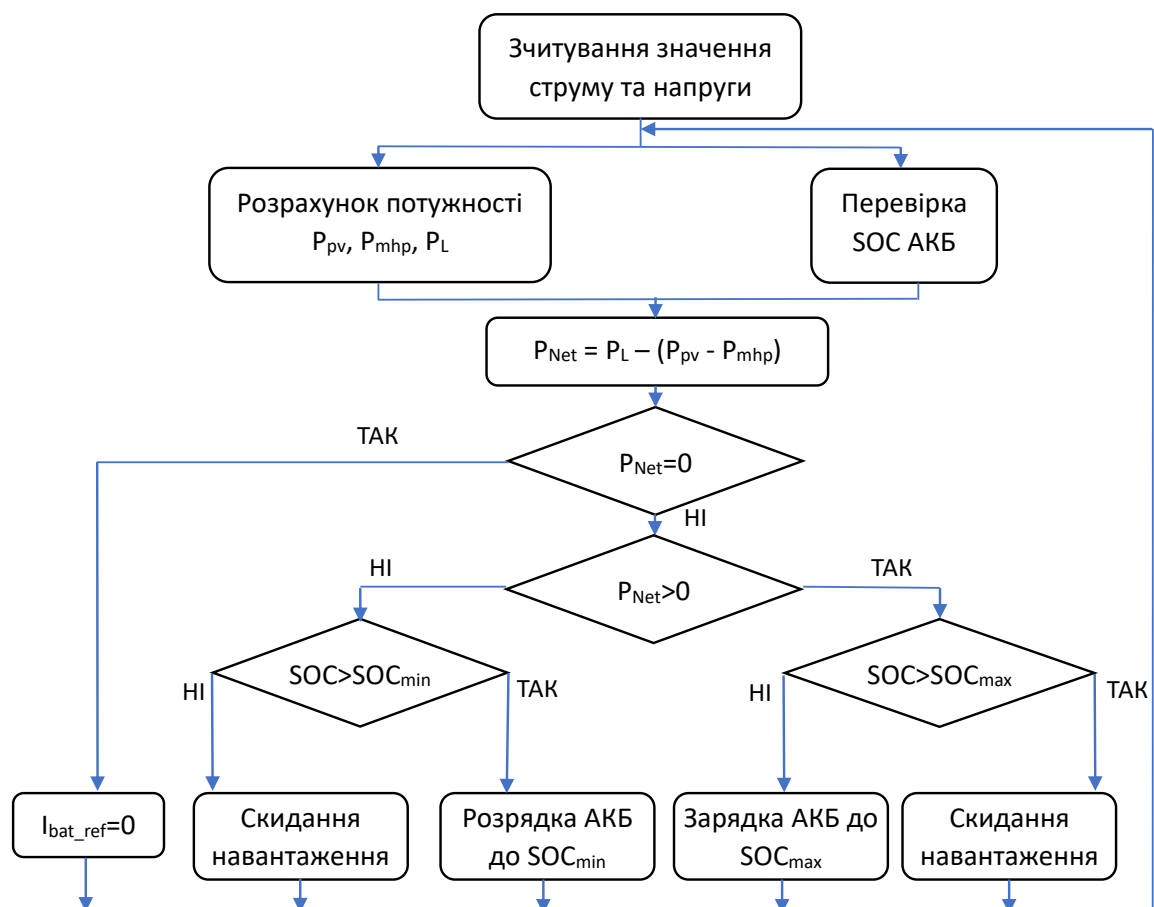


Рисунок 2.29 - Алгоритм керування енергоспоживанням

Коли потужність системи МГЕС та фотоелектричних панелей перевищує потребу навантаження, надлишок потрібно зберігати. Коли потужність системи МГЕС та фотоелектричних панелей менша за потребу навантаження, акумуляторна батарея повинна видавати енергію в мережу. Зарядка або розрядка акумулятора також залежить від стану заряду акумулятора під час коливань. Тому вкрай важливо забезпечити енергетичну безпеку за допомогою системи енергетичного менеджменту, яка контролює, експлуатує та організовує систему зберігання акумуляторних батарей, відновлювані джерела енергії та силові електронні перетворювачі.

2.15 Висновки до розділу

1. Подано і описано структуру мікромережі постійного струму з підключенням до мережі змінного струму .
2. Представлено математичні залежності, які описують роботу сонячних фотоелектричних систем, і будуть використані для подальших розрахунків.
3. Описано принцип роботи перетворювачі потужності для мікромережі постійного струму, а саме двонаправлений перетворювач постійного струму в постійний та інвертор.
4. Представлено принципова схема та математичну модель мікро-ГЕС, ідеальну та неідеальну моделі турбін.
5. Описано роботу запропонованої системи, яка складається з двох джерел живлення - фотоелектричних модулів, МГЕС та акумуляторних батарей в якості резервної системи.
6. Наведено параметри сонячної фотоелектричної системи та характеристику споживачів. Визначено кількість та під'єднання фотоелектричних панелей. Розраховано загальну генеровану потужність, яка складатиме до 102,47 енергії за годину.

7. Описано роботу DC-DC перетворювача для нормалізації напруг та інвертора.
8. Для зменшення наявності гармонік у отриманій напрузі постійного струму запропоновано використовувати L-фільтр або LC-фільтр.
9. З використанням MATLAB/SIMULINK побудовано імітаційні моделі мікро-ГЕС.
10. Проведено розрахунок потужності, яку може генерувати запропонована мікро-ГЕС. Встановлено, що вона генеруватиме до 95,66 кВт енергії за годину.
11. Представлено імітаційну модель акумуляторної батареї та модель доконаправленого перетворювача для неї. Розраховано значення елементів його схеми.
12. Розроблено алгоритм керування енергоспоживанням.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Вихідні дані та методика імітаційного моделювання

Необхідність електрифікації сільської місцевості, скорочення викидів парникових газів та збільшення попиту на енергію через зростання населення та підвищення рівня життя спонукали світ до використання відновлюваних джерел енергії. Традиційні енергосистеми переважно розташовані ближче до навантаження, яке здебільшого знаходиться в міській місцевості, тому використання гібридної автономної системи має вирішальне значення для електрифікації сільської місцевості. Це зумовлено рельєфом місцевості та розкиданим характером цих населених пунктів і зменшує навантаження на мережу. Це також зменшує експлуатаційні витрати завдяки зниженню витрат на мережу. Гібридна система, що складається з заводу з виробництва біомаси, фотоелектричних модулів та акумуляторної батареї, була змодельована та імітована в середовищі MATLAB/Simulink. У цьому розділі обговорюються результати, отримані після моделювання. Чотири випадки були протестовані для перевірки енергоменеджменту системи. Система має пікове навантаження 180 кВт змінного струму для 50 домогосподарств, яке живиться трифазним інвертором від джерела постійного струму. МГЕС потужністю 95 кВт підключена через випрямляч до шини постійного струму. Фотоелектрична батарея потужністю 102 кВт з підвищувальним перетворювачем DC-DC, який підвищує напругу до 750 В на шині постійного струму. Літій-іонна батарея також підключена до шини постійного струму через двонаправлений DC-DC перетворювач.

У цьому розділі обговорюються результати моделювання в MATLAB/Simulink з використанням інструментарію *simpower* і нечіткого логічного керування. Опромінення буде змінюватися, щоб імітувати реальне колювання сонячної енергії, оскільки вона залежить від погодних умов. Результати розділені на чотири менші розділи. По-перше, в розділі 3.2

обговорюються результати для випадку 1, де інтенсивність випромінювання підтримується постійною на рівні 1000 Вт/м^2 .

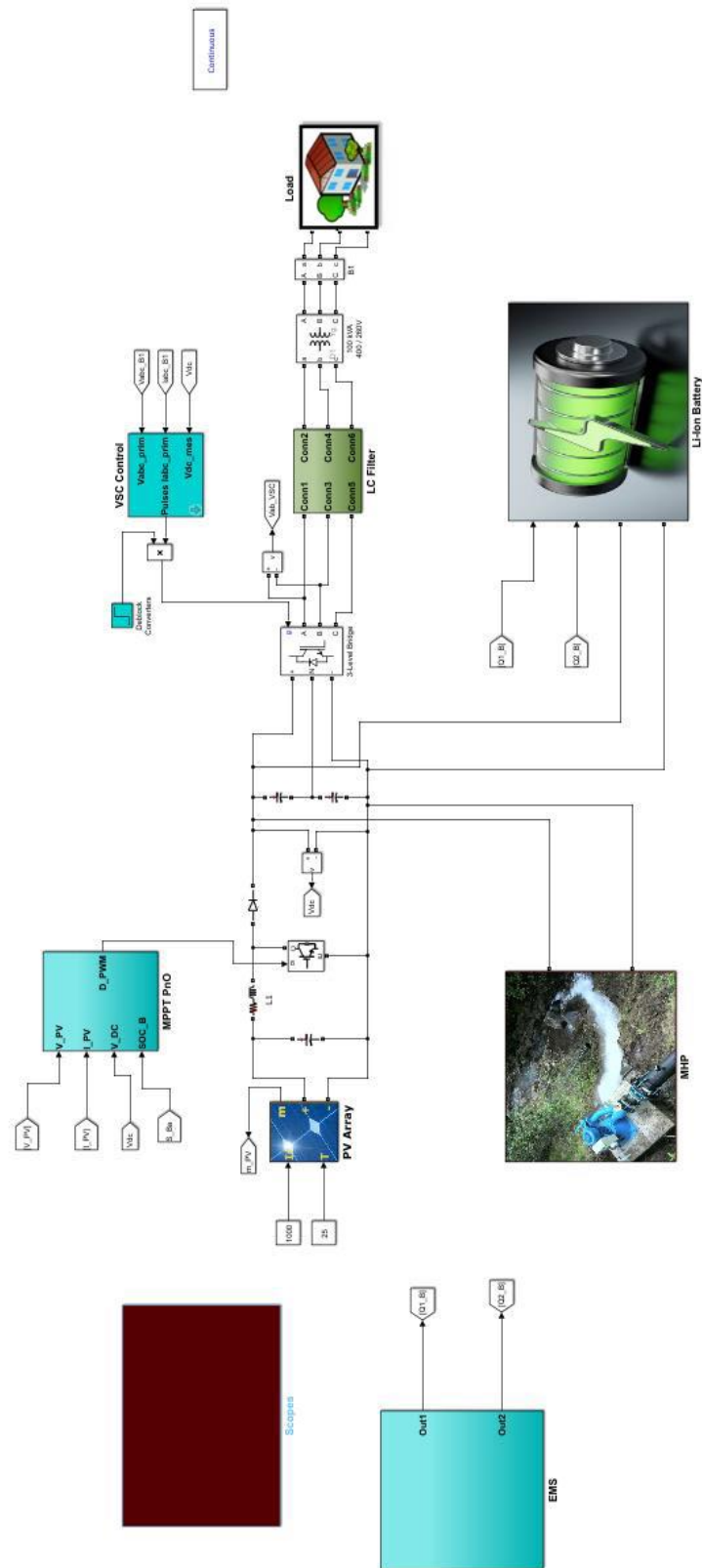


Рисунок 3.1 – Імітаційна модель системи

Система виробляє більше, ніж потрібно, в той час як МГЕС виробляє постійну потужність. У розділі 3.3 розглядається випадок 2, де освітленість

становить 400 Вт/м^2 , а загальна потужність відновлюваної енергії менша за потребу. Саме в цьому випадку акумуляторна батарея повинна працювати в режимі диспетчеризації. Крім того, в розділі 3.4 розглядається зміна освітленості від 1000 Вт/м^2 до 400 Вт/м^2 , а потім назад до 1000 Вт/м^2 . Батарея буде заряджатися і розряджатися в залежності від виробленої енергії з відновлюваних джерел. Нарешті, в розділі 3.5 досліджується поведінка системи, коли стан заряду (SOH) акумулятора менше 20% і виробляється менше енергії, ніж потрібно. Далі розглядається ситуація, коли виробляється більше енергії, але SOH перевищує 80%. Все це робиться для того, щоб перевірити управління енергоспоживанням системи і те, як вона реагує на різні випадки, які цілком можливі в реальному житті.

3.2 Випадок 1

По-перше, освітленість буде підтримуватися на рівні 1000 Вт/м^2 , а фотоелектричний масив складається з 28 модулів, з'єднаних паралельно і 16 послідовно, кожен модуль виробляє 228 Вт, таким чином, він забезпечує близько 102,2 кВт. Фотоелектричні модулі підключені до підвищувального перетворювача постійного струму з робочим циклом 0,362 для стабілізації випадкової вхідної напруги фотоелектричних модулів від 478,40 В до 750 В. Масив підключений до підвищувального перетворювача постійного струму через конденсатор постійного струму для мінімізації пульсацій напруги на фотоелектричних клемах. Для отримання енергії з масиву використовується алгоритм Р&О МРРТ. Система побудована з використанням фізико-електронних компонентів, таких як діоди, конденсатори, резистори, джерела струму для побудови еквівалентної схеми сонячного елемента. Потужність 102,2 кВт була отримана за нормальних умов випробувань при освітленості 1000 Вт/м^2 і температурі 25°C . Вихідна потужність фотоелектричної установки показана на рисунку 3.2 нижче.

Потужність, що генерується фотоелектричною установкою, становить 102,20 кВт при освітленості 1000 Вт/м^2 , як показано на рисунку 3.2 нижче, і температурі 25°C . Розраховане значення становить 102,47 кВт, що дає похибку 0,003%, що робить результати моделювання дуже точними. Перехідний час для стабілізації фотоелектричної потужності становить 15 мс в системі, зображений на рисунку 3.3.

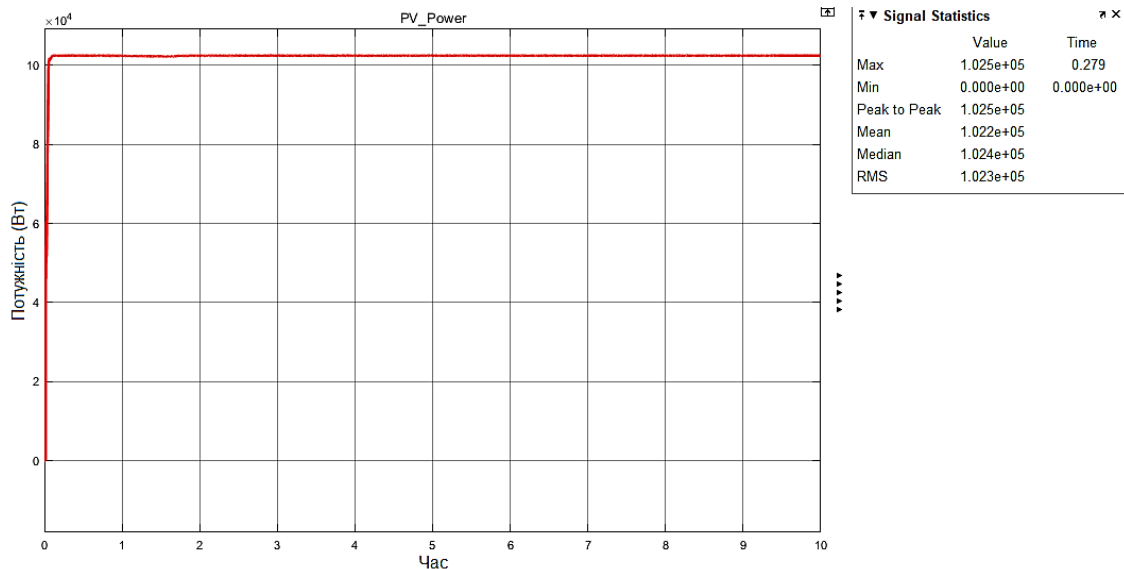


Рисунок 3.2 – Вихідна потужність фотоелектричної системи при постійному опроміненні

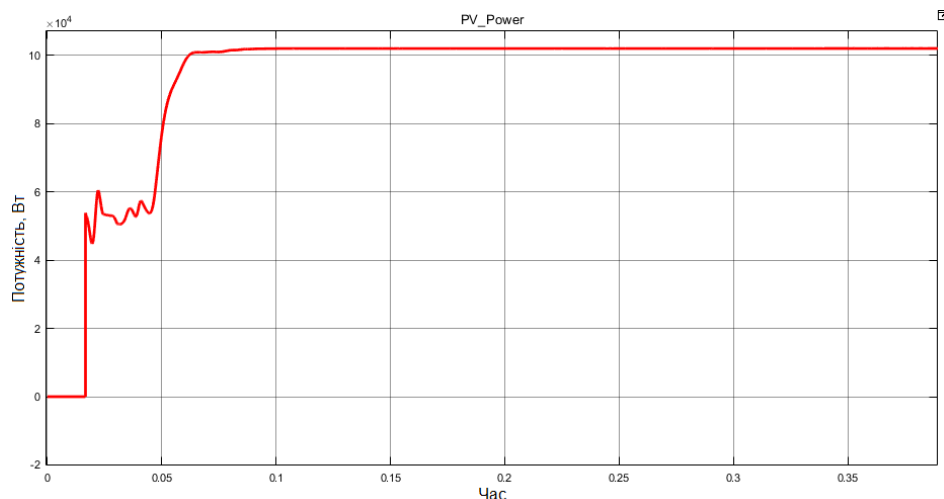


Рисунок 3.3 – Час перехідного процесу вихідної потужності фотоелектричної системи

Вихідна напруга, показана на рисунку 3.4 нижче, ілюструє вихідну напругу фотоелектричної системи до підвищення, яка становить 476 В постійного струму, в той час як розрахована напруга становить 478,40 В

постійного струму, що становить 99,4% точності, і показує, наскільки точними є результати моделювання. Крім того, робочий цикл варіюється, причому 0,362 є середнім значенням для забезпечення 750 В постійного струму на шині постійного струму. Перехідний стан для стабілізації як вхідної, так і вихідної напруги становить 20 мс.

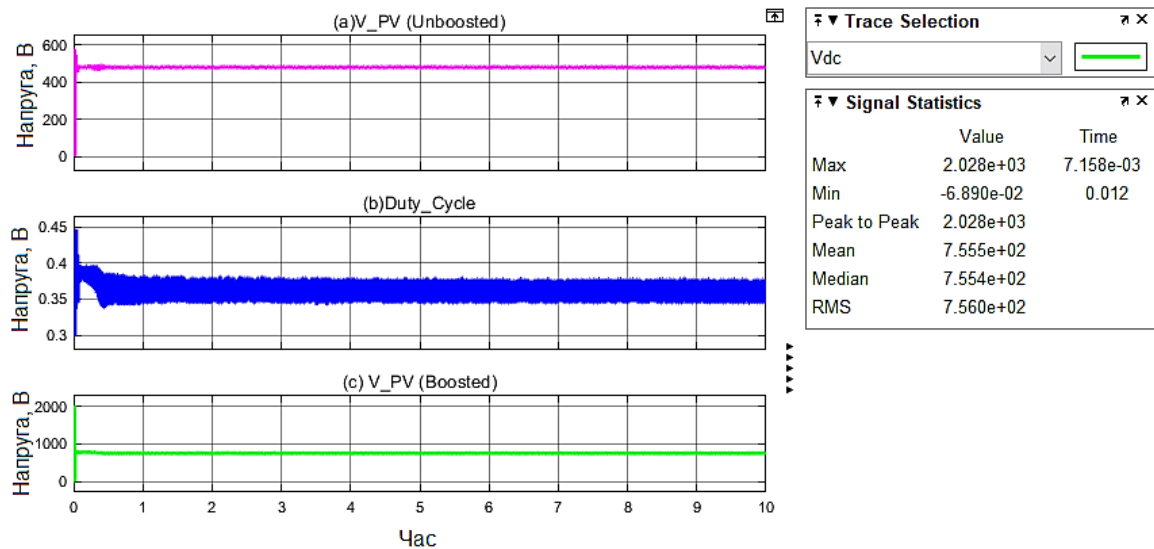


Рисунок 3.4 – Напруга фотоелектричної батареї (а) без підвищення, (в) з підвищенням і (б) робочий цикл

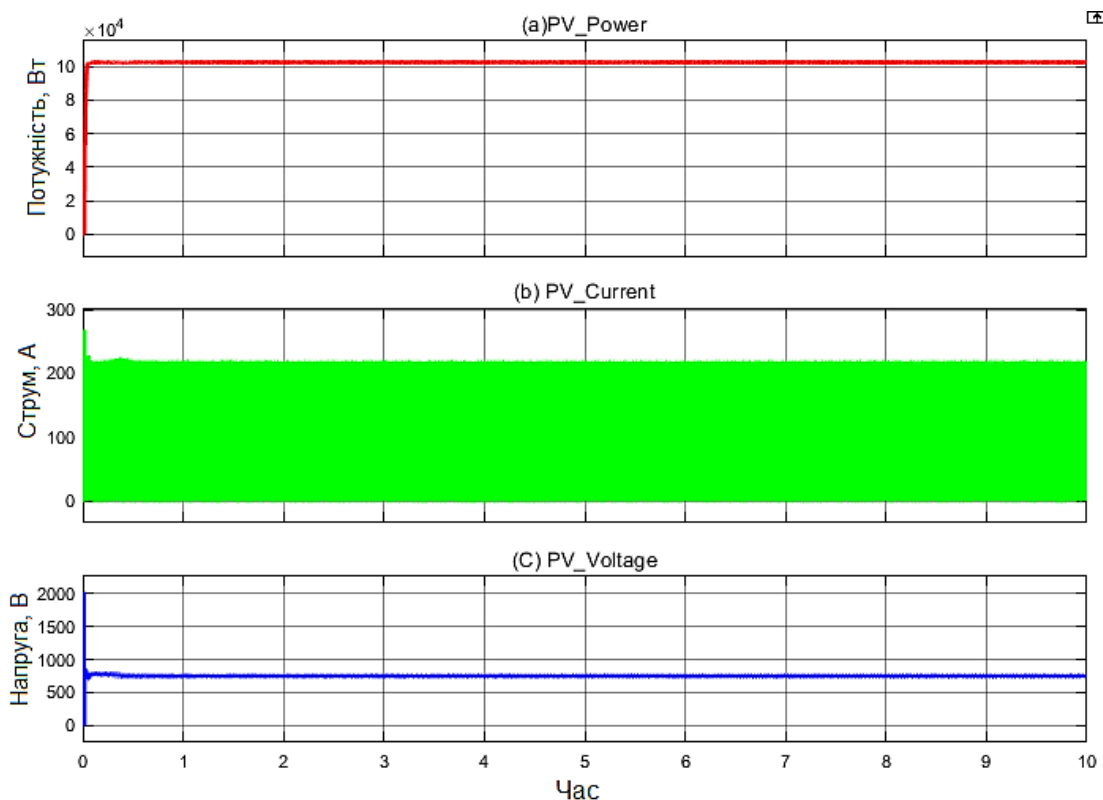


Рисунок 3.5 – Фотоелектрична батарея (а) потужність, (б) струм, (в) напруга

МГЕС буде генерувати близько 96,18 кВт, на відміну від розрахованої, яка дає 95,66 кВт, що показує, що точність становить 99,4%. Видно, що від 0 с до 400 мс – це перехідний стан, а від 400 мс до 800 мс досягається стаціонарний стан. Це пов'язано з раптовим механічним моментом через кінетичну енергію води на лопатях, відбувається стрибок швидкості валу, отже, експоненціальна потужність від початкового початку моделювання до 800 мс. Зрештою коливання затухають, і стаціонарний стан досягається при $t=1$ сек, як показано на рисунках 3.6 і 3.7 нижче.

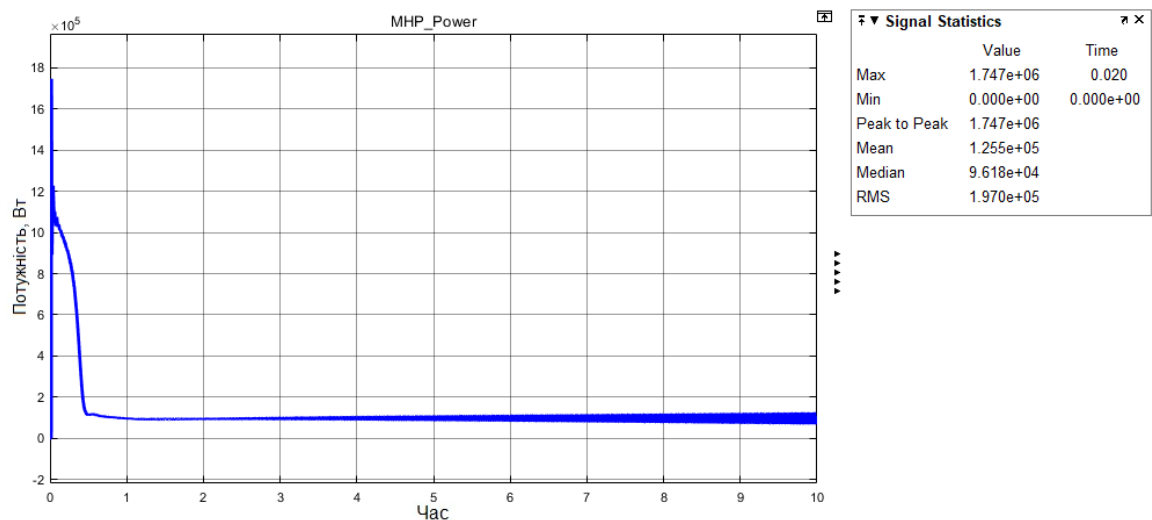


Рисунок 3.6 – Вихідна потужність МГЕС

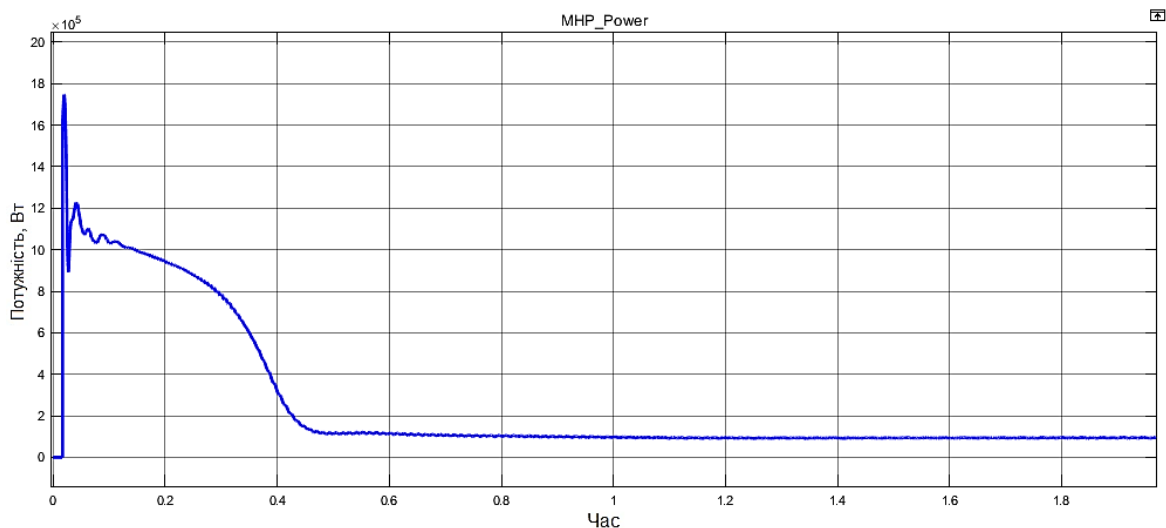


Рисунок 3.7 – Час перехідного процесу МГЕС

При постійному опроміненні 1000 Вт/м^2 , загальна вироблена відновлювана потужність становить 198,38 кВт, що більше, ніж потреба.

Надлишок виробленої енергії потім поглинається літій-іонним акумулятором для зарядки батареї. Це проілюстровано на рисунку 3.8, де SOH змінюється від 50%, що є початковим станом заряду, до 50,19%. Початковий рівень заряду є високим через стрибок МГЕС і експоненціальну потужність через високу швидкість обертання перед скиданням. SOH змінюється з 50% до 50,10% за 320 мс. Однак цей процес сповільнюється, коли регулятор турбіни контролює швидкість обертання турбіни, регулюючи об'ємну витрату шляхом зменшення відкриття шлюза. Згодом потужність МГЕС досягає стаціонарного стану через 400 мс, і зарядка стає значно нижчою. Результати також показують, що для переходу від 50,10% до 50,19% потрібно 9 с, що свідчить про повільну зарядку.

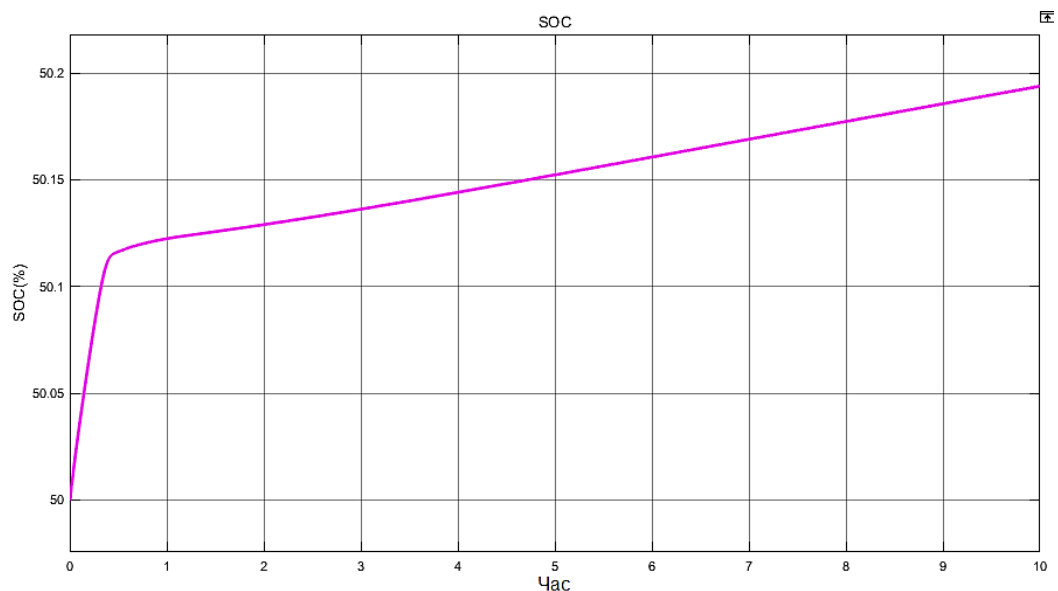


Рисунок 3.8 – Заряджання акумулятора (SOH зростає)

Характеристики літій-іонного акумулятора зображені на рисунку 3.9, а саме: напруга, струм, SOH і вихідна потужність. При освітленості 1000 Вт/м^2 генерується більше енергії, ніж потрібно, отже, батарея поглинає енергію. Це демонструється збільшенням SOH і від'ємним значенням струму акумулятора. Навантаження також підтримується постійним на рівні 180 кВт, а батарея знаходиться в режимі заряджання.

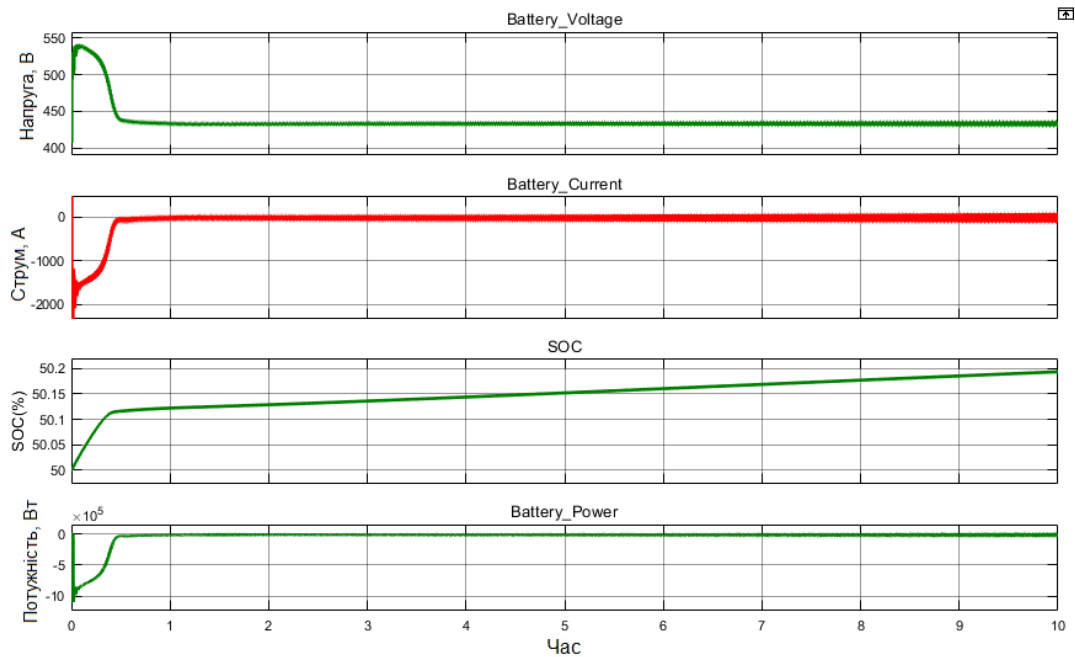


Рисунок 3.9 – Акумулятор: напруга, струм, SOH, потужність

На рисунку 3.10 зображено характеристики системи при постійному опроміненні з навантаженням, яке підтримується постійним на рівні 180 кВт. Система виробляє більше енергії, ніж потрібно, тому батарея заряджається, що призводить до збільшення SOH. Потужність від МГЕС підтримується на постійному рівні при витраті $0,27 \text{ м}^3/\text{с}$, що дозволяє генерувати близько 96,18 кВт, і попит задовольняється.

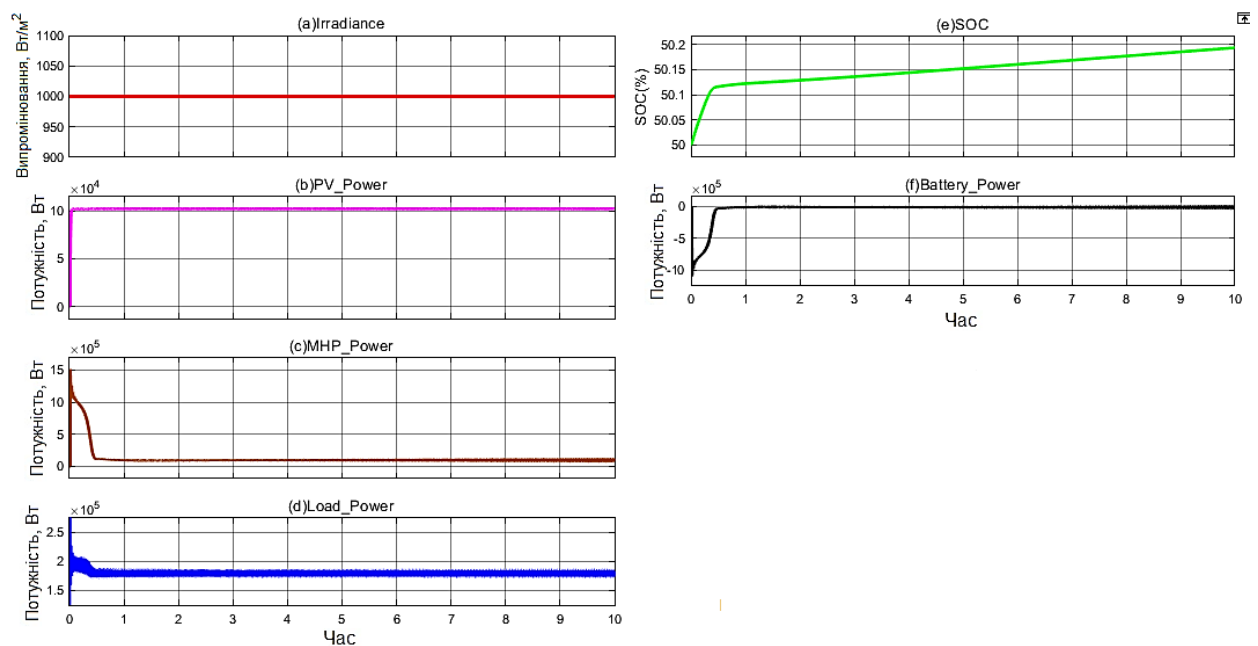


Рисунок 3.10 – Характеристики системи (а) освітленість, потужність фотоелектричних установок, (в) потужність МГЕС (г) потужність навантаження (д) коефіцієнт сонячного випромінювання та (е) потужність акумулятора

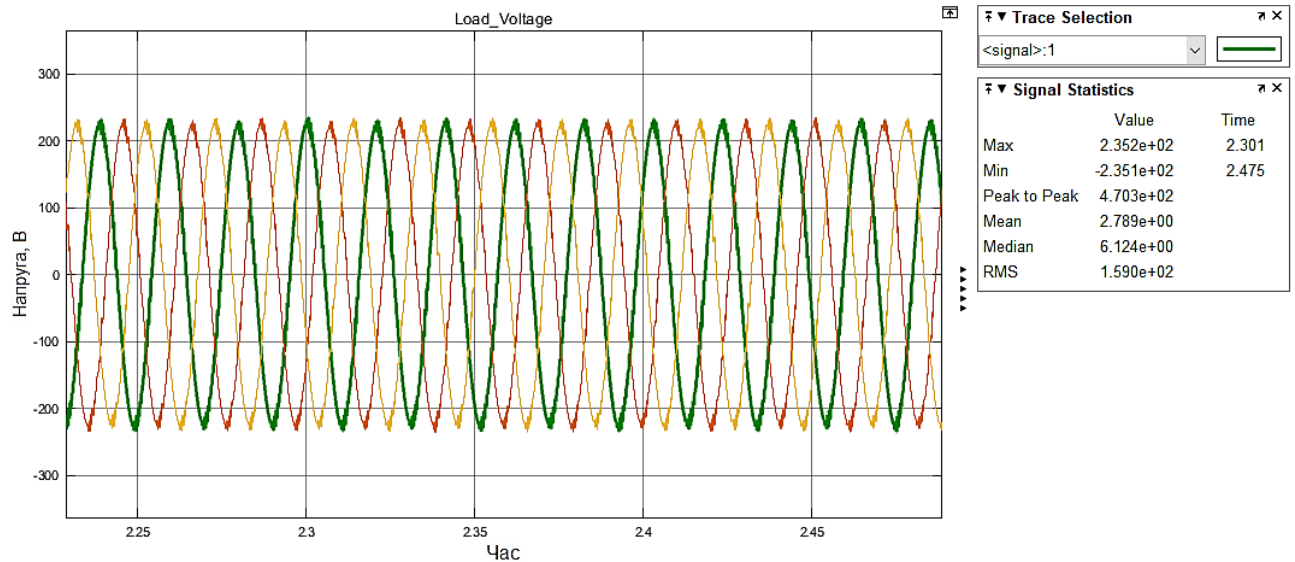


Рисунок 3.11 – Напруга навантаження

Напруга на навантаженні не змінюється і підтримується на рівні близько 235 В, незважаючи на більшу потужність, вироблену системою, як показано на рисунку 3.10 вище.

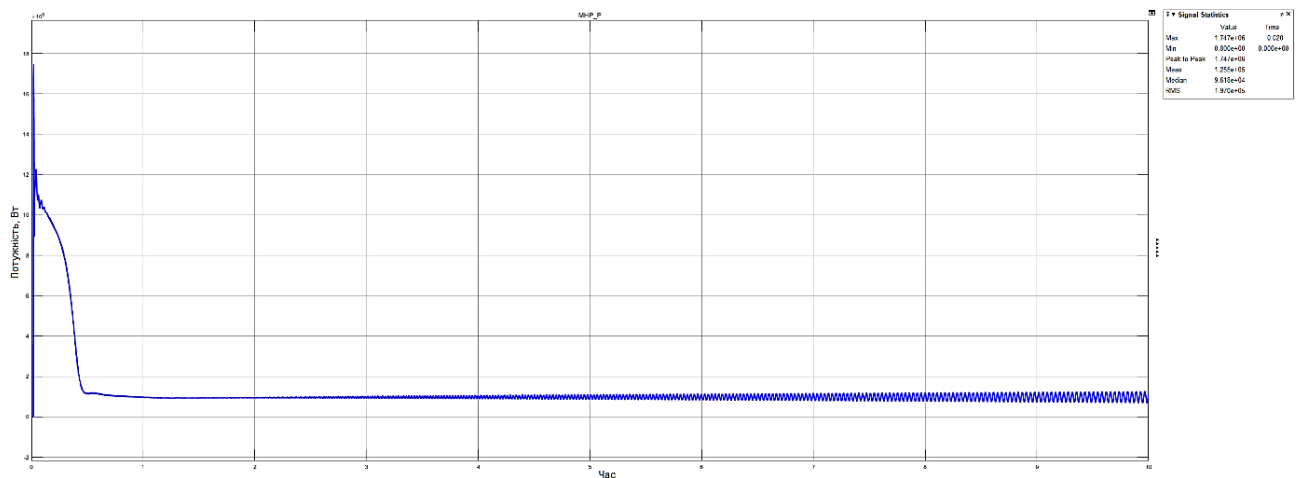


Рисунок 3.12 – Потужність МГЕС

3.3 Випадок 2

На відміну від першого випадку, де показані ідеальні погодні умови, це не завжди так. Відновлювані джерела енергії, безсумнівно, є мінливими, тому, безумовно, відбуватимуться коливання потужності через погодні умови. Сонячне випромінювання зменшиться на вході в фотоелектричний масив з 1000 Вт/м^2 до 400 Вт/м^2 . Потужність, що генерується фотоелектричними

модулями, становить близько 41,22 кВт, як показано на рисунку 3.13, яка потім додається до потужності МГЕС, і система генерує близько 123,60 кВт, як показано на рисунку 3.14 (а). Це, безумовно, менше, ніж вимагає навантаження. Згідно з алгоритмом керування енергією на рисунку 2.29, батарея повинна розподіляти енергію, щоб задовольнити попит навантаження. У цьому стані батарея перебуватиме в режимі розряду, як показано на рисунку 3.14(b) за зменшенням SOH. Таким чином, система зберігання літій-іонних акумуляторів забезпечує близько 42,6 кВт для компенсації дефіциту потужності, оскільки їхня вироблена потужність менша за попит.

На рисунку 3.14 зображено характеристики системи в цьому випадку, оскільки SOH підтримується на рівні 50%, а потужність МГЕС залишається незмінною. SOH батареї змінюється від 50% заряду за 0,80 с до 50,1%, що пов'язано з високою початковою потужністю від МГЕС, потім батарея розряджається, отже, SOH змінюється від 50,10% до 49,84%.

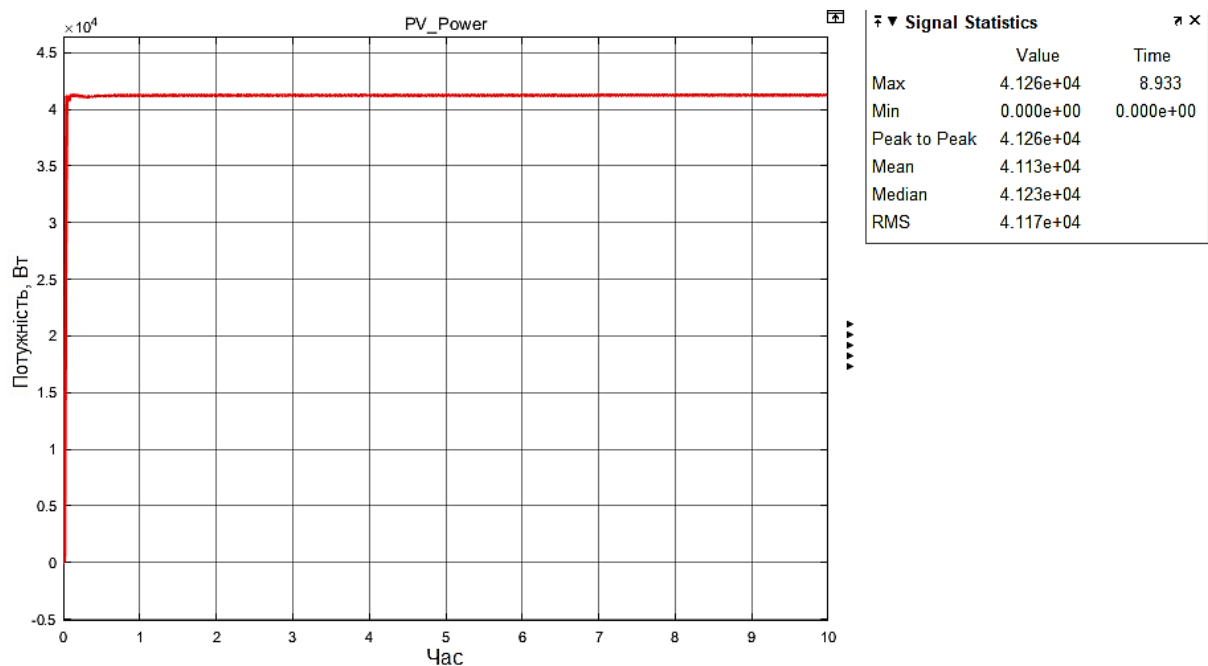


Рисунок 3.13 - Фотоелектрична потужність при 400 Вт/м²

Коли опромінення утримується на рівні 400 Вт/м², потужність фотоелектричних модулів становить 41,22 кВт, а на рисунку 3.15(c) показано потужність акумулятора і те, як він компенсує дефіцит потужності. Батарея

видає близько 55,28 кВт, а потужність навантаження стає 179,50 кВт, що менше від потреби на 0,27%.

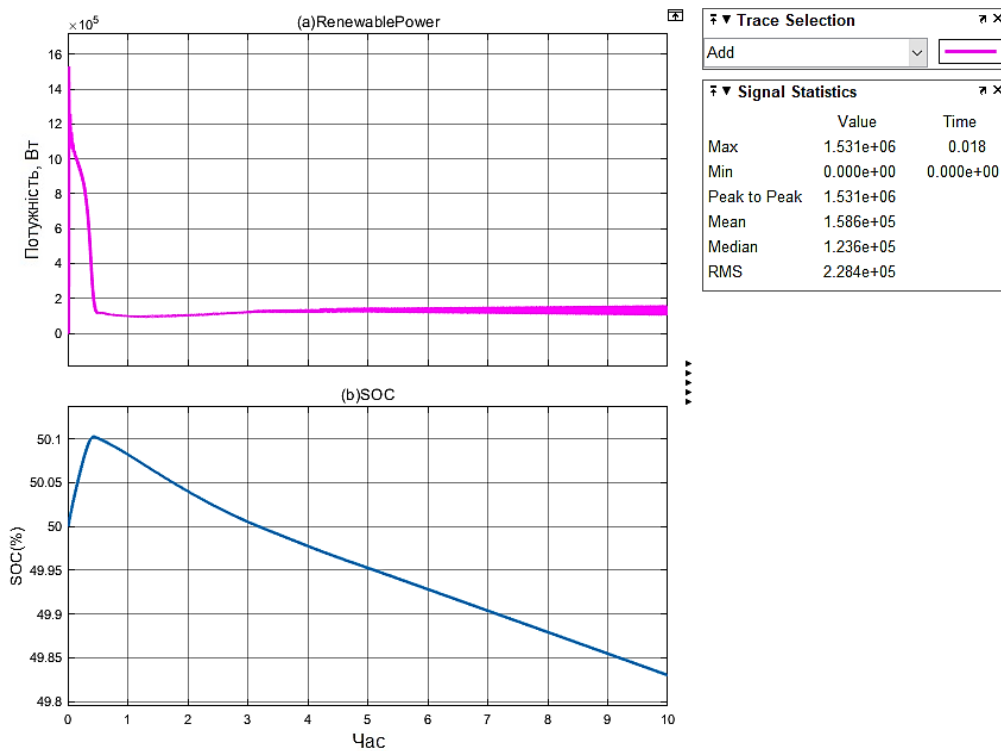


Рисунок 3.14 - Потужність МГЕС (а) і (б) SOC акумулятора

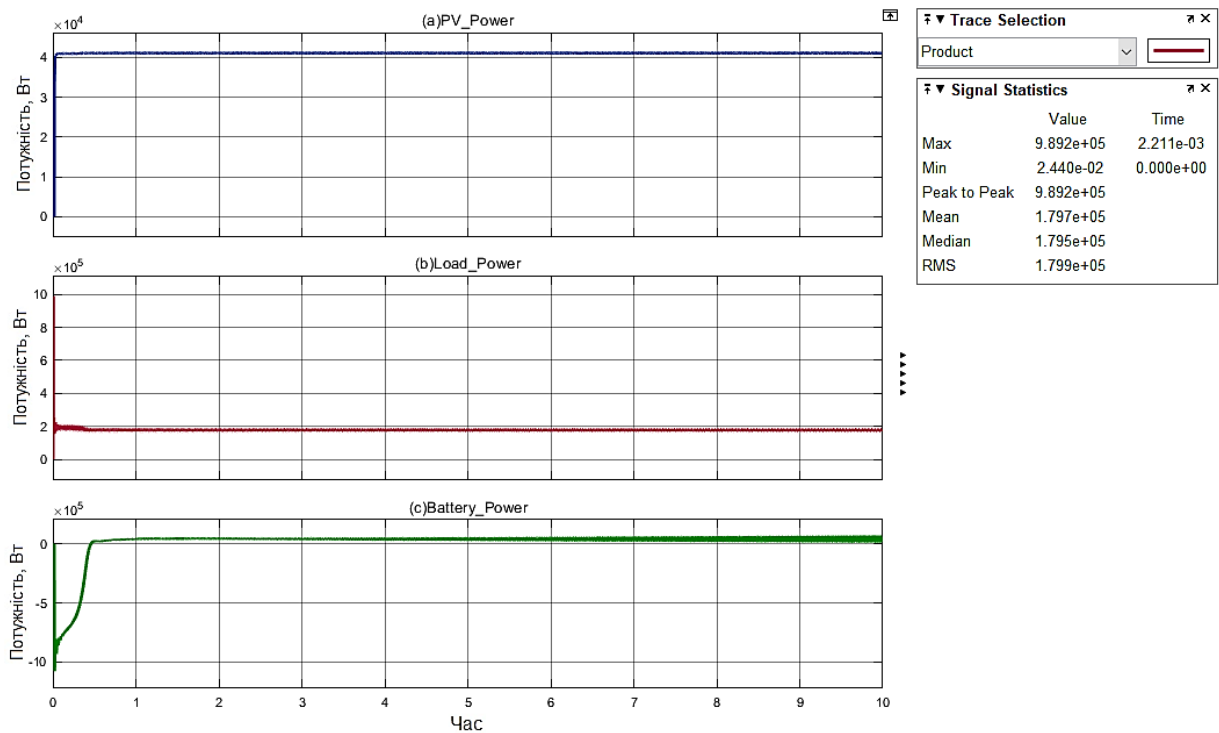


Рисунок 3.15 – Потужність фотоелектричної системи (а), навантаження (б) та акумуляторної батареї (с)

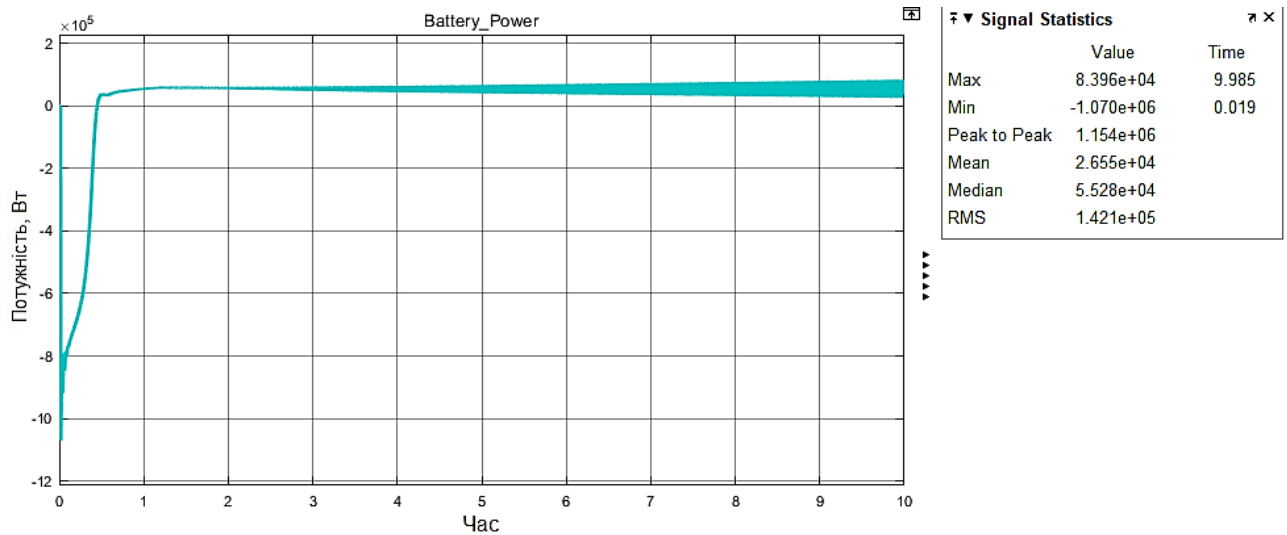


Рисунок 3.16 - Живлення від акумулятора

3.4 Випадок 3

У цьому випадку опромінення становитиме 1000 Вт/м^2 протягом перших чотирьох секунд. Потужність, що генерується в цьому випадку, перевищує попит, отже, батарея буде заряджатися, що можна побачити за покращенням показника SOH на рисунку 3.17 (е). За перші чотири секунди SOH збільшується з 50% до 50,15%. Потім випромінювання падає до 400 Вт/м^2 з чотирьох секунд до семи секунд. Потужність, вироблена з відновлюваних джерел, безумовно, нижча за ту, що потрібна навантаженню, тому батарея буде передавати енергію на навантаження, щоб компенсувати невідповідність, показану на рисунку 3.17(f). Після цього SOH акумуляторної системи знижується з 50,15% до 50,08%, як показано на рисунку 3.17 (е) нижче. Протягом більшої частини чотирьох секунд заряд батареї тримається на рівні 0.

Однак ця ситуація змінюється між чотирма і сімома секундами, коли батарея передає енергію на навантаження. Випромінювання швидко повертається до 1000 Вт/м^2 , а потім раптова зміна потужності спричиняє незначні коливання потужності навантаження. Батарея знову потребує заряджання, оскільки згенерована потужність тепер більша, ніж потреба. SOH покращується з 50,08% до 50,11% з семи секунд до десяти секунд, після чого моделювання припиняється.

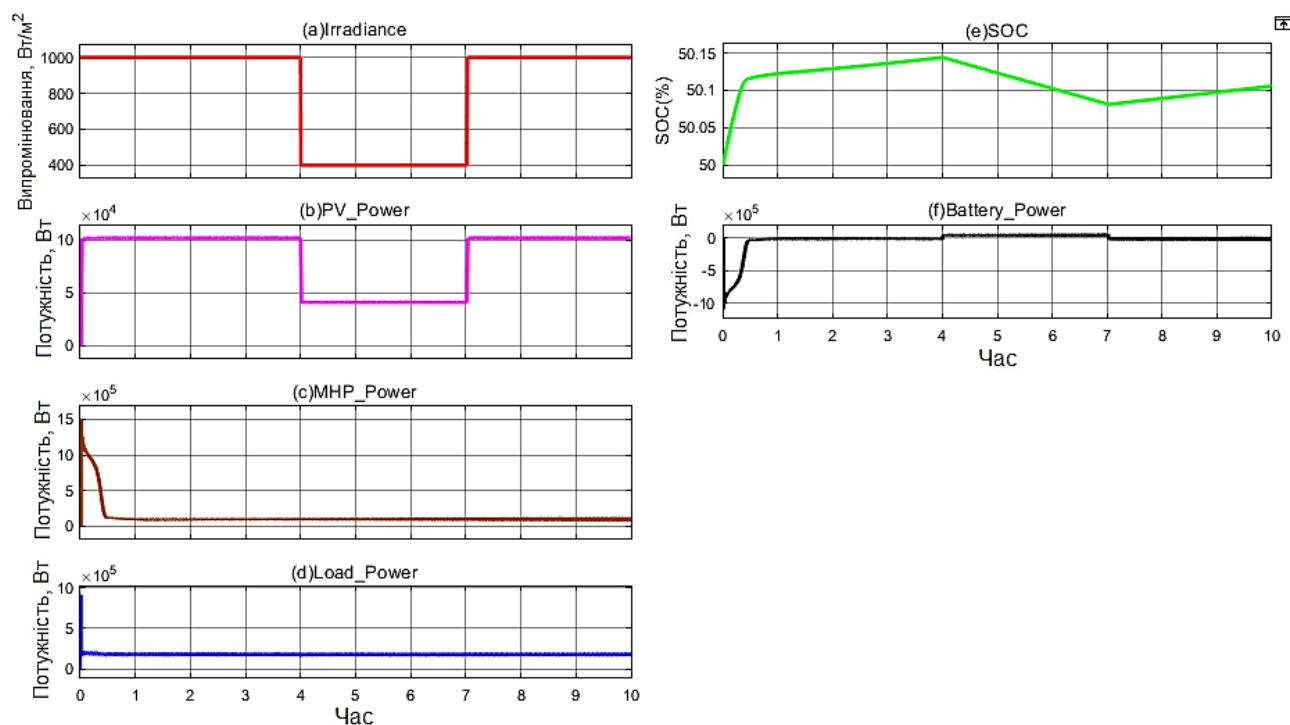


Рисунок 3.17 – Характеристики системи: випромінювання, фотоелектрична потужність, потужність МГЕС, потужність навантаження, SOH і потужність акумулятора

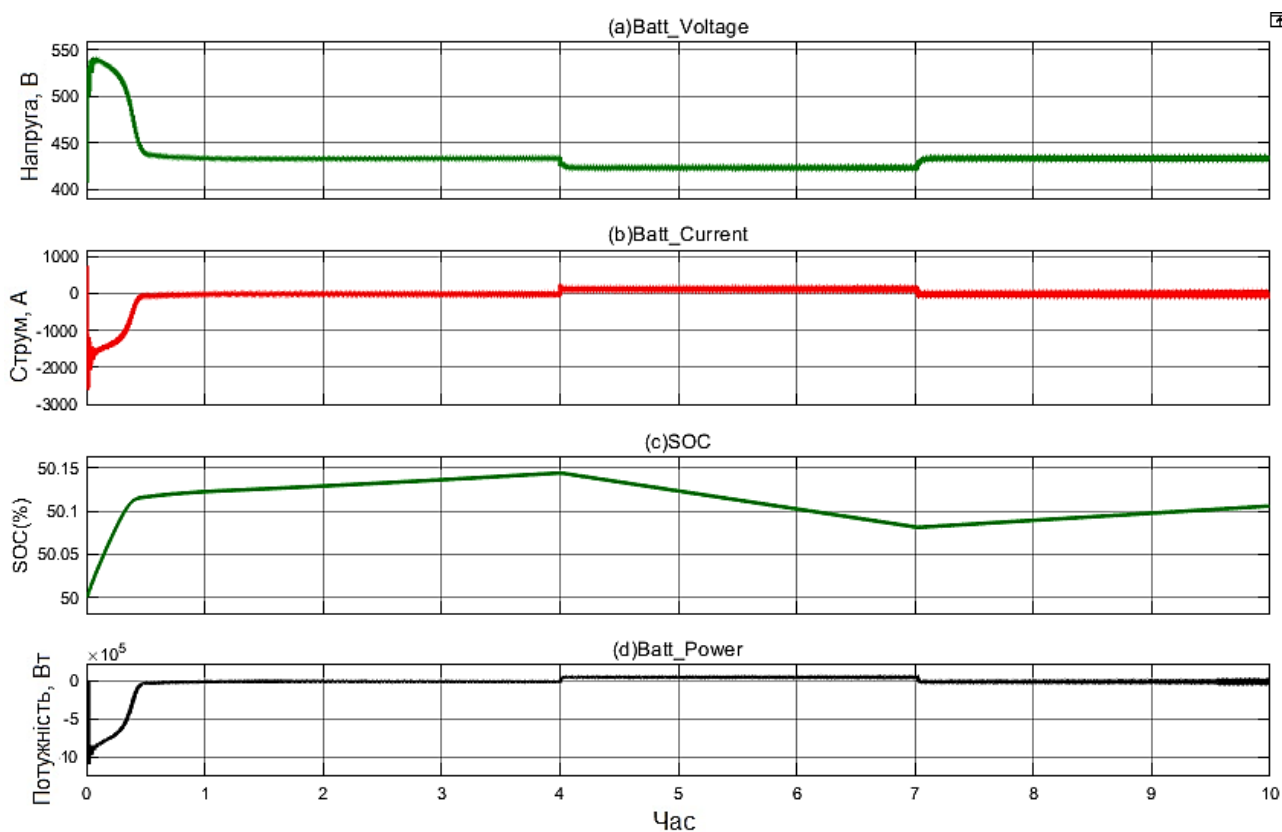


Рисунок 3.18 – Характеристики акумулятора (а) напруга, (б) струм, (с) SOH і (д) потужність

Струм акумулятора є від'ємним протягом перших чотирьох секунд, і це сигналізує про те, що акумулятор заряджається (рис. 3.17 (b)). Потім струм стає позитивним, коли фотоелектрична потужність падає, батарея віддає енергію і струм стає позитивним. Це вказує на режим розрядки акумулятора.

Потужність на навантаженні залишається постійною на рівні 180,20 кВт, як показано на рисунку 3.18(b), незважаючи на коливання фотоелектричної потужності, що призводить до зменшення загальної потужності, що генерується.

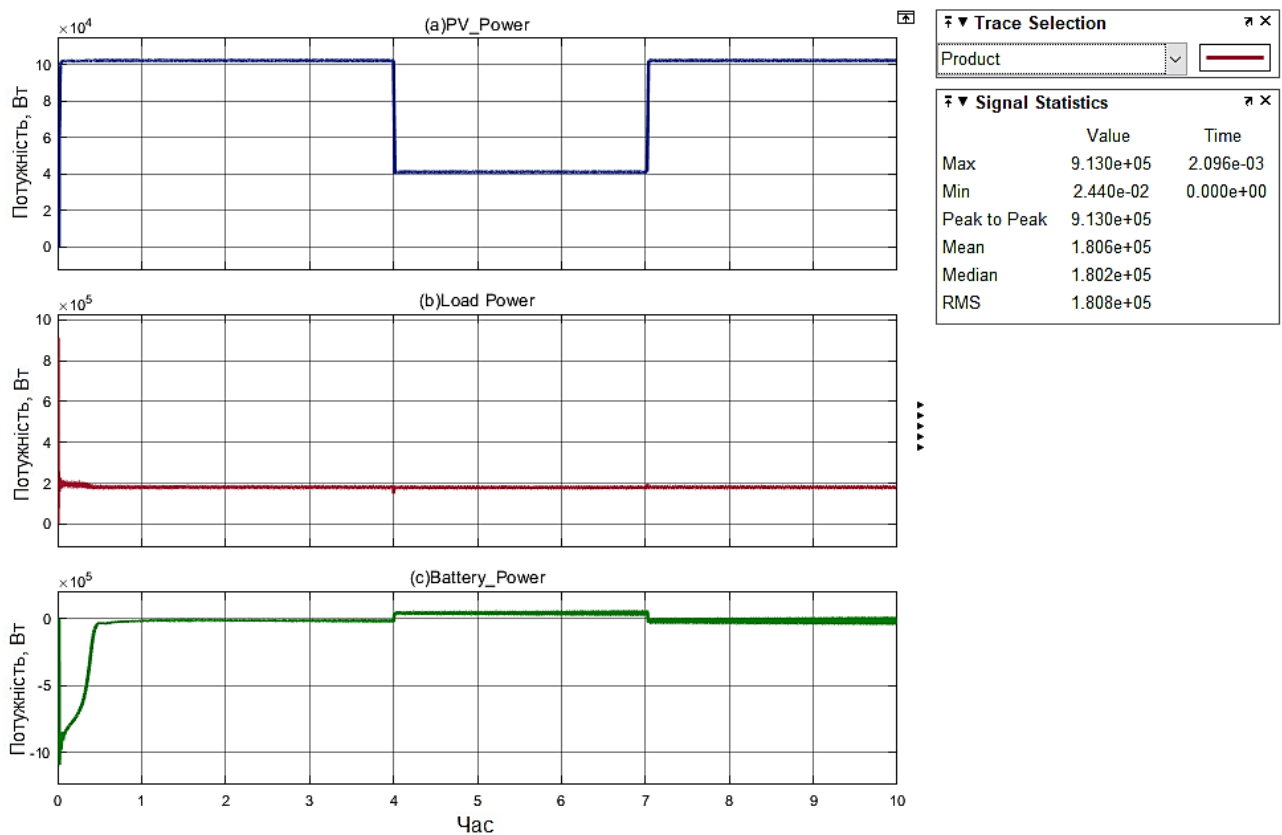


Рисунок 3.19 – Система (а) Потужність ФЕС (б) Потужність навантаження (с) Потужність акумулятора

3.5 Випадок 4

Накопичувачі енергії мають високу початкову вартість і короткий термін служби, тому дуже важливо підтримувати їх у належному стані, щоб запобігти перезарядженню і глибокому розряду. В останньому випадку інтенсивність сонячного випромінювання змінюється від 400 Вт/м² до 600 Вт/м², в обох

випадках потужність фотоелектричних модулів коливається від 41,22 кВт до 62,42 кВт. Як показано на рисунку 3.20(b), загальна потужність відновлюваної енергії становить близько 149,40 кВт, що нижче 180 кВт, які є попитом. У випадках, коли SOH перевищує 20%, батарея спрямовує енергію для покриття навантаження, але зараз вона становить 18%, але не відправляє енергію для запобігання глибокому розряду. На рисунках 3.20(c) і 3.20(d) показано, що SOH залишається постійним, а потужність батареї становить 0 кВт.

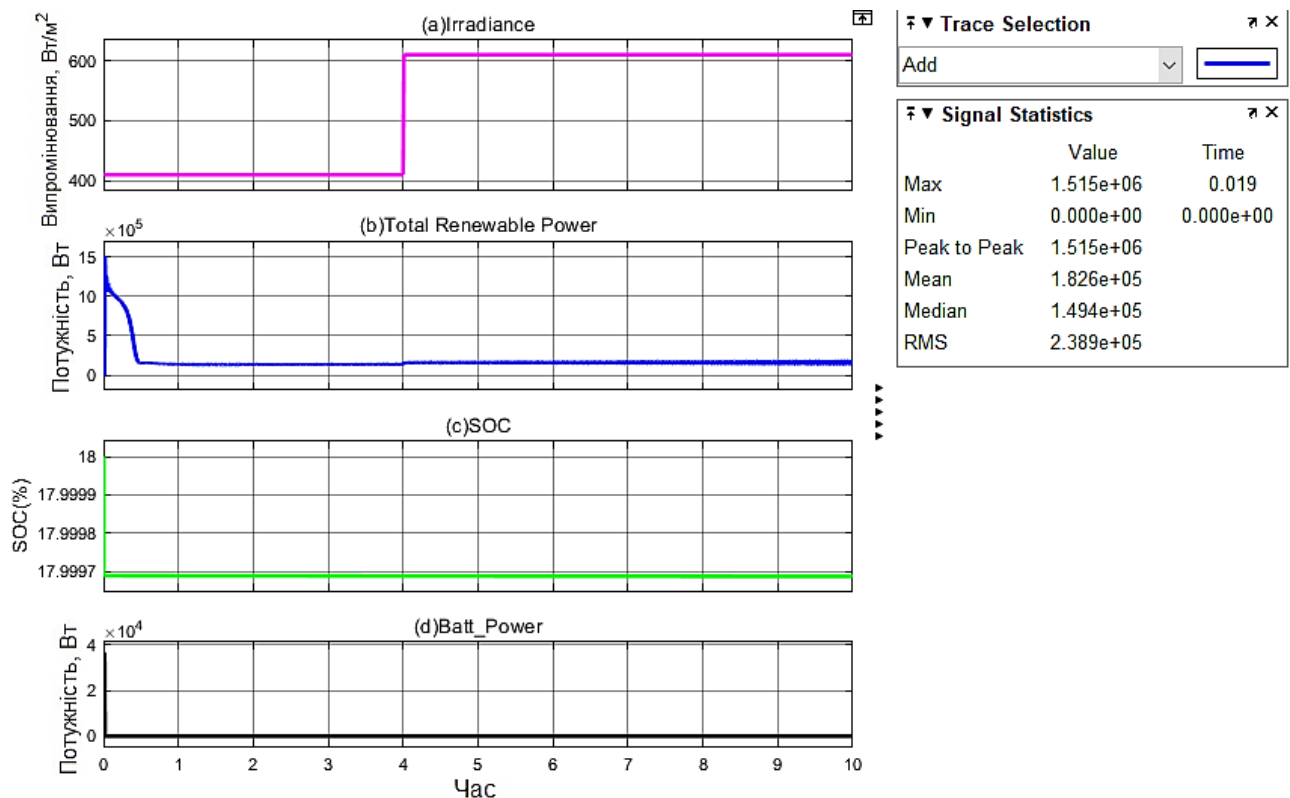


Рисунок 3.20 - Характеристики: випромінювання, МГЕС, SOH<20% і потужність акумулятора

На рисунку 3.21(б) згенерована потужність перевищує потребу навантаження, але SOH перевищує 80%. Система акумуляторів не заряджається, щоб запобігти перезарядці. На рисунку 3.21(d) потужність батареї залишається 0 кВт, а SOH залишається постійним на рівні 82%, як показано на рисунку 3.21(c). Це робиться для того, щоб підтримувати батарею в хорошому стані і продовжити термін її служби.

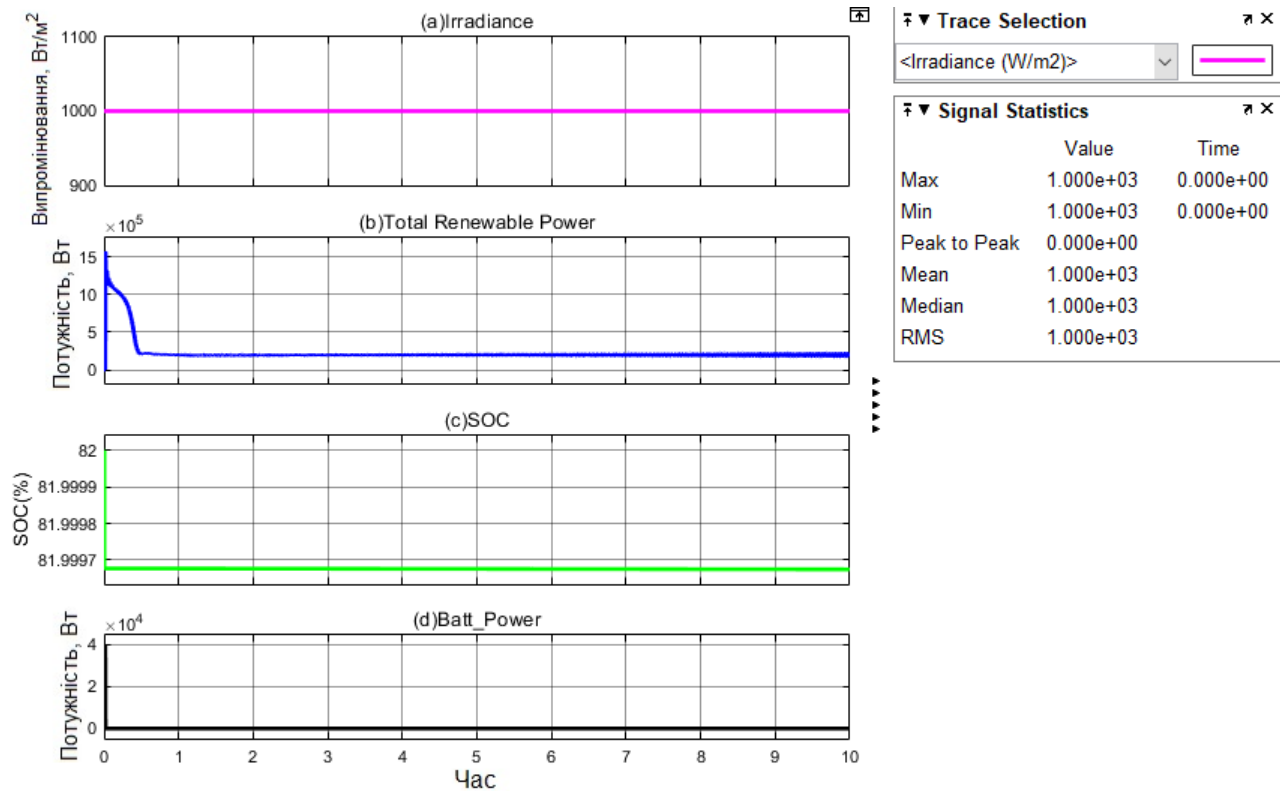


Рисунок 3.21 - (а) Освітленість (b) Відновлювана енергія (c) SOH > 80% і
(d) Заряд акумулятора

3.6 Аналіз результатів

По-перше, при порівнянні потужності, згенерованої під час симуляції, і розрахованої, всі вони перевищують 99% з точки зору точності, і наскільки точною є система, як показано в таблиці 3.1 нижче.

Таблиця 3.1 – Потужність ФЕС та МГЕС та напруги отриманих розрахунковим шляхом та шляхом імітаційного моделювання у Matlab/Simulink

Джерело	Розрахована потужність	Згенерована потужність у Matlab/Simulink	Точність (%)
Фотоелектрика	102,47 кВт	102,20 кВт	99,7
МГЕС	95,66 кВт	96,18	99,4
Напруга фотоелектричної системи	478,4 V _{dc}	476 V _{dc}	99,5

По-друге, система працює дуже добре з точки зору стабілізації потужності, де у фотоелектричній системі для стабілізації потужності потрібно лише 15 мс. Система МГЕС потребує трохи більше часу для стабілізації, що є результатом високого механічного тертя від кінетичної енергії на лопатях турбіни. Це призводить до експоненціального зростання потужності, яка генерується до того, як демпінг регулятора стає повністю ефективним. 0,8 секунди потрібно, щоб ГЕС досягла стаціонарного стану.

По-третє, загальна робота системи з точки зору управління енергією є дуже ефективною і забезпечує чудові результати. В управлінні енергією використовується механізм нечіткого логічного управління, який контролює, чи заряджається або розряджається батарея через двонаправлений перетворювач. Вхідною змінною для механізму виведення є помилка, що генерується з виробленої потужності і навантаження, також з SOH. Вхідні дані застосовуються до набору правил керування «ЯКЩО/ТОДІ», потім нечіткі виходи підсумовуються в дискретні значення, необхідні для керування механізмом керування.

Перетворювач вирішує, чи заряджати або розряджати батарею в залежності від стану, або не заряджати і не розряджати. У випадку 1 батарея заряджається, оскільки виробляється більше енергії, а SOH менше 80%, як пояснюється алгоритмом, зображеним на рисунку 2.40. Напруга на шині змінного струму підтримується на рівні 235 В, а на шині постійного струму - 750 В постійного струму після підвищення. Випадок 2 - безперервне живлення навантаження підтримується, незважаючи на коливання освітленості, і батарея видає 55,28 кВт потужності, щоб компенсувати невідповідність.

Випадок 3 показує, коли система генерує більше енергії, ніж навантаження, потім вироблена потужність падає через чотири секунди після коливання освітленості, а потім раптово знову генерується більше енергії. Це показує заряджання, отже, покращення стану заряду (SOH) протягом чотирьох секунд, потім SOH зменшується, оскільки батарея відправляє енергію, а потім знову заряджається через сім секунд, коли освітленість покращується.

Випадок 4 фокусується на двох крайнощах, коли SOH перевищує $SOH_{\max}$ і нижче $SOH_{\min}$, як буде поводитися система. Контроль енергоменеджменту запобігає перезарядці акумулятора і його глибокому розряду.

Нарешті, батарея реагує на будь-які коливання протягом 5 мс, щоб пом'якшити невідповідність між навантаженням і живленням.

3.7 Висновки до розділу

1. Для перевірки енергоменеджменту системи електропостачання виконано моделювання її роботи за 4-ма випадками. Дана система має пікове навантаження 180 кВт змінного струму для 50 домогосподарств, які живляться від трифазного інвертора і від джерела постійного струму. В склад системи електропостачання входять:
 - МГЕС потужністю 95 кВт підключена через випрямляч до шини постійного струму;
 - фотоелектричні панелі потужністю 102 кВт з підвищувальним перетворювачем DC-DC, який підвищує напругу до 750 В на шині постійного струму;
 - літій-іонна батарея також підключена до шини постійного струму через двонаправлений DC-DC перетворювач.
2. У першому випадку опромінення підтримується на рівні 1000 Вт/м^2 , а потужність фотоелектричних перетворювачів стає 102,40 кВт. МГЕС вносить близько 96,18 кВт, що дає 198,58 кВт, однак це більше, ніж потреба навантаження 180 кВт. Акумуляторна батарея поглинає надлишкову потужність, вироблену в режимі зарядки, і SOH збільшується з 50% до 50,19%.
3. У другому випадку, на відміну від першого, опромінення залишається на рівні 400 Вт/м^2 , а комбінована потужність від фотоелектричних модулів і МГЕС становить 123,60 кВт, що менше, ніж 180 кВт, необхідних для навантаження. Падіння потужності було зафіксовано, і

батарея видає потужність 56,4 кВт (включить потужність батареї в результати), щоб задовольнити невідповідність між попитом і пропозицією. Тепер батарея знаходиться в режимі розрядки, і SOH зменшується з 50% до 49,84%, а реакція на зміну освітленості становить 0,01 секунди.

4. Третій випадок - коли випромінювання змінюється від 1000 Вт/м² до 400 Вт/м², а потім повертається до 1000 Вт/м². У випадках, коли випромінювання становить 1000 Вт/м² протягом перших чотирьох секунд, батарея переходить в режим заряду, оскільки вироблена потужність перевищує навантаження, і SOH збільшується з 50% до 50,15%. Потім випромінювання падає до 400 Вт/м² через чотири-шість секунд. Невідповідність відчувається, і батарея подає енергію в систему, отже, позитивний струм, а SOH знижується з 50,15% до 50,08%. Потім випромінювання повертається до 1000 Вт/м² від семи секунд до десяти секунд, і струм стає від'ємним, що означає, що батарея перебуває в режимі заряджання, отже, SOH збільшується з 50,08% до 50,11%.
5. Випадки доводять, що застосований алгоритм керування енергоспоживанням здатний захистити батарею, контролюючи заряджання та розряджання. Крім того, забезпечується безперервний потік енергії для задоволення попиту навантаження навіть при коливаннях у електропостачанні.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання

Загальні вимоги безпеки до конструкції виробничого обладнання встановлені ДНАОП.

Безпека виробничого обладнання забезпечується [26]:

- при проектуванні - дотриманням принципів технологічності і ергономічності конструкції, застосуванням раціональних кінематичних схем, принципу безперервності процесу, дистанційного або автоматичного управління, забезпеченням запобіжними та захисними системами;
- при виготовленні - застосуванням сучасних технологій машинобудування, дотриманням передбачених допусків та посадок;
- при збірці та монтажі - точним дотриманням технології;
- при експлуатації - своєчасним обслуговуванням та профілактичними оглядами, дотриманням експлуатації, тощо.

Виробниче обладнання має бути пожежо- і вибухобезпечним. Воно не повинно створювати небезпеки в результаті дії вологості, сонячної радіації, механічних коливань, високих і низьких тисків і температур, агресивних речовин і мікроорганізмів.

Важливою умовою безпечної експлуатації обладнання є дотримання вимог санітарних норм і правил, галузевих стандартів і правил техніки безпеки щодо розмірів виробничих приміщень, галерей і тунелів, мінімальної висоти до низу виступаючих будівельних конструкцій, ширини проходів.

Рухомі частини обладнання, що є джерелом небезпеки, повинні бути огорожені, за виключенням частин, огороження яких не допускається за їх функціональним призначенням. У цих випадках передбачається сигналізація, що попереджує про пуск машин в роботу, засоби зупинки і відключення джерел

енергії. При наявності машин значної довжини (наприклад, транспортерів) засоби зупинки повинні розміщуватись не рідше як через кожні 10 м їх довжини.

Елементи конструкцій виробничого обладнання не повинні мати гострих кутів, кромek і поверхонь з нерівностями, що становлять собою джерело небезпеки, якщо їх наявність не визначається функціональним призначенням обладнання.

Конструкція обладнання повинна виключати можливість випадкового дотику працюючих до гарячих і переохолоджених частин. Виділення і поглинання обладнанням тепла, а також виділення їм вологи у виробничих приміщеннях не повинно перевищувати гранично допустимі! рівні (концентрації) в межах робочої зони.

4.2 Заходи безпеки при монтажі енергоустановок

Роботи в електроустановках, що стосується заходів безпеки, діляться на три категорії [26]: 1) зі зняттям напруги; 2) без зняття напруги на струмовідних частинах і поблизу них; 3) без зняття напруги не на струмовідних частинах, що знаходяться під напругою.

У випадку одночасної роботи в електроустановках напругою до і понад 1000 В категорії робіт визначаються як для установок більше 1000 В.

До робіт, які виконуються зі зняттям напруги, належать роботи, які здійснюються в електроустановці (або її частини), в якій з струмопровідних частин знято напругу і доступ в електроустановки (або їх частини), що знаходяться під напругою, стало неможливим.

До робіт, які виконуються без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них, належать роботи, що проводяться безпосередньо на цих частинах. Роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них слід виконувати не менше як двом працівникам, з яких керівник робіт повинен мати групу IV, інші - групу III.

В електроустановках напругою понад 1000 В роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них слід виконувати із застосуванням засобів захисту для ізоляції працівника від струмопровідних частин або від землі. У випадку ізоляції працівника від землі роботи слід виконувати згідно спеціальних інструкцій або технологічними картами, в яких передбачені необхідні заходи безпеки.

Під час роботи в електроустановках напругою до 1000 В без зняття напруги на струмопровідних частинах або поблизу від них необхідно:

- захистити розташовані поблизу робочого місця інші струмопровідні частини, які знаходяться під напругою, і до яких можливо випадковий дотик;
- працювати в діелектричній взуття, стоячи або на ізолювальних підставці або на діелектричному килимі;
- застосовувати інструмент з ізолювальними рукавами (у викруток, крім того, повинен бути ізольований стрижень); за відсутності такого інструменту слід користуватися діелектричними рукавичками.

Під час виконання робіт без зняття напруги на струмопровідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно:

- Тримати ізолювальні частини засобів захисту за рукави до обмежувального кільця;
- Розміщувати ізолювальні частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмопровідними частинами двох фаз чи замикання на землю;
- Користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

У разі виявлення порушень лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними забороняється.

У процесі роботи із застосуванням електрозахисних засобів (ізолювальні штанги та кліщі, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги) допускається наближення працівника до струмопровідних частин на відстань, яка визначається довжиною ізолювальної частини цих коштів.

Всі працівники, які знаходяться у приміщеннях з чинним електрообладнанням електростанцій і підстанцій (за винятком щитів керування релейних та їм подібних приміщень), в ЗРУ, ВРУ, в колодязях, тунелях і траншеях зобов'язані користуватися захисними касками.

4.3 Організація оповіщення персоналу об'єктів та населення про НС техногенного і природного характеру

Залежно від причин походження подій, що зумовили або можуть зумовити виникнення надзвичайних ситуацій на території України, розрізняють надзвичайні ситуації техногенного, природного, соціального та воєнного характеру, а в залежності від обсягів заподіяних наслідків, кількості постраждалих і загиблих, обсягів технічних і матеріальних ресурсів, необхідних для їх ліквідації, надзвичайні ситуації класифікуються як державного, регіонального, місцевого та об'єктового рівня [27].

До надзвичайних ситуацій техногенного характеру зараховуються транспортні аварії (катастрофи), пожежі, неспровоковані вибухи чи їх загроза, аварії з викидом (загрозою викиду) небезпечних хімічних, радіоактивних, біологічних речовин, раптове руйнування споруд та будівель, аварії на інженерних мережах і спорудах життєзабезпечення, електроенергетичних системах, аварії в системах нафтогазового промислового комплексу, на очисних спорудах, гідродинамічні аварії на греблях, дамбах.

До надзвичайних ситуацій природного характеру зараховуються небезпечні геологічні, метеорологічні, гідрологічні явища, деградація ґрунтів чи надр, пожежі в природних екосистемах, зміни стану повітряного басейну, інфекційна захворюваність та масове отруєння людей, інфекційні захворювання сільськогосподарських тварин, масова загибель диких тварин, ураження сільськогосподарських рослин хворобами та шкідниками.

Оповіщення населення про загрозу та виникнення НС, своєчасне та достовірне інформування про фактичну обстановку і вжиті заходи.

З метою виконання завдання у всіх ланках міських і позаміських пунктів на основі автоматизованих систем централізованого оповіщення, мережі зв'язку і радіомовлення, а також спеціальних засобів, створюється система оповіщення та інформаційного забезпечення. Вона являє собою комплекс організаційно-технічних засобів для передачі відповідних сигналів і розпоряджень органам державної виконавчої влади, адміністрації підприємств, установ і організацій, силам ЦЗ і населенню.

Автоматизована система оповіщення та інформаційного забезпечення створюється на базі загальнодержавної мережі зв'язку та радіомовлення і поділяється на державну і регіональну. Система має забезпечити циркулярне оповіщення посадових осіб із застосуванням для цього міської телефонної мережі, засобів радіомовлення і телебачення.

Система оповіщення та інформаційного забезпечення використовується централізовано.

Сповіщення підлеглих штабів ЦЗ і НС, сил ЦЗ і населення організує вищестоящий штаб ЦЗ і НС.

Здійснюється опрацювання інформації про НС, видання інформаційних матеріалів з питань захисту населення і територій від наслідків НС

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано історію розвитку фотоелектричних та гідроенергетичних систем, принцип роботи, їх роль в енергосистемі на сьогоднішній день.

2. Розроблено гібридну мікромережеву систему електропостачання з резервним накопичувачем енергії. Система генерує 180 кВт для 50 домогосподарств. Вона складається з фотоелектричних панелей встановленою потужністю 100 кВт, підвищувального перетворювача постійного струму, системи МГЕС встановленою потужністю 95 кВт, системи зберігання на основі літій-іонних акумуляторів такою ємністю щоб забезпечити добове енергоживлення, двонаправленого перетворювача постійного струму та трифазного інвертора.

3. Розроблено алгоритм керування енергоспоживанням та проведено перевірку його роботи шляхом імітаційного моделювання для чотирьох випадків у середовищі Matlab/Simulink.

6. У першому випадку сонячне випромінювання підтримується на рівні 1000 Вт/м^2 , а потужність фотоелектричних перетворювачів становить 102,40 кВт. МГЕС генерує близько 96,18 кВт, що дає в результаті 198,58 кВт, однак це більше, ніж потреба навантаження 180 кВт. Акумуляторна батарея поглинає надлишкову потужність, вироблену в режимі зарядки, і SOH збільшується з 50% до 50,19%.

7. У другому випадку, на відміну від першого, опромінення зменшується до рівня 400 Вт/м^2 , а комбінована потужність від фотоелектричних модулів і МГЕС становить 123,60 кВт, що менше, ніж 180 кВт, необхідних для навантаження. Було зафіксовано падіння потужності, і батарея почала видати потужність 56,4 кВт, щоб задовольнити невідповідність між попитом і пропозицією. Тепер батарея знаходиться в режимі розрядки, і SOH зменшується з 50% до 49,84%. Реакція системи на зміну сонячного випромінювання становить 0,01 секунди.

8. Третій випадок - коли випромінювання змінюється від 1000 Вт/м^2 до 400 Вт/м^2 , а потім повертається до 1000 Вт/м^2 . У випадках, коли випромінювання становить 1000 Вт/м^2 протягом перших чотирьох секунд, батарея переходить в режим заряду, оскільки вироблена потужність перевищує навантаження, і SOH збільшується з 50% до 50,15%. Потім випромінювання падає до 400 Вт/м^2 через чотири-шість секунд. Невідповідність відчувається, і батарея подає енергію в систему, а SOH знижується з 50,15% до 50,08%. Потім випромінювання повертається до 1000 Вт/м^2 від семи секунд до десяти секунд, і батарея перебуває в режимі заряджання, отже, SOH збільшується з 50,08% до 50,11%.

9. Результати моделювання доводять, що запропонований алгоритм керування енергоспоживанням забезпечує більшу енергоефективність системи, здатний захистити батарею, контролюючи заряджання та розряджання. Крім того, забезпечується безперервний потік енергії для задоволення попиту навантаження навіть при коливаннях у електропостачанні.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Перспективи розвитку електроенергетики і роль відновлювальних джерел енергії// Невідомський М.В.; Копит М.Б.; Якимчук П.М.; Горлачук М.А.; Войтович І.А./Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XIII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11–12 груд. 2024.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: 2024. Т. 2. – 17-18
2. Коваль В.П. Фотоелектрична станція для забезпечення власних потреб // В.П. Коваль, Д.Ф.Паловці, Abul Kalam Azad / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С.
3. Moussavou, A., & Akim, A. (2014). Modelling and analysis of microgrid control techniques for grid stabilisation (Doctoral dissertation, Cape Peninsula University of Technology).
4. Shiji, C., Dhakal, S., & Ou, C. (2021). Greening small hydropower: A brief review. *Energy Strategy Reviews*, 36, 100676.
5. Creation and substantiation of the matrix for model series of tubular propeller turbines for small hydropower plants / Myroslav Zin, Vadym Koval, Mykola Tarasenko, Ivan Sysak // *Scientific Journal of TNTU*. — Tern. : TNTU, 2023. — Vol 109. — No 1. — P. 24–31.
6. Стельмах С.С. Енергоефективність гідроакумуючих установок малої потужності // С.С.Стельмах, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 71.

7. Types of Hydropower Plants. (<https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants>)
8. Anaza, S. O., Abdulazeez, M. S., Yisah, Y. A., Yusuf, Y. O., Salawu, B. U., & Momoh, S. U. (2017). Micro hydro-electric energy generation-An overview. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 6(2), 5-12.
9. Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing // *Proceedings of the International Conference „Advanced applied energy and information technologies 2021”*, 2021
10. Коваль В. П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів/ В. П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Л.М. Костик, Я.М.Осадца// *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2022. – № 5. – С. 168-173.
11. Bohdan Orobchuk, Ivan Sysak, Oleh Buniak, Serhii Babiuk, Vadym Koval (2023) Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. *The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2023 (ITTAP 2023)*. Ternopil, Ukraine, November 22-24, 2023, Vol. 3628, Pages 574-585.
12. Малушенко А.С. Перспектива зарядки електромобілів від відновлювальних джерел енергії // А. С. Малушенко; М.Б. Горват; В. П. Коваль / *Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]*. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 225.
13. Vadym Koval, Serhii Martsenko, Myroslav Zin (2023). Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. *The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023)*. Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.

- 14.Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10
- 15.Коваль В. Залежність енергоефективності сонячних елементів від експлуатаційних факторів / В. Коваль // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. Івана Пулюя, 20-21 листопада 2013 року. — Т. : ТНТУ, 2013. — Том I : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 53.
- 16.Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.
- 17.Orobchuk B. Development and research of Wi-Fi network for receiving and transmitting telemechanical information in the training laboratory / Bogdan Orobchuk, Vadym Koval // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2020. — Vol 99. — No 3. — P. 124–132.
- 18.Vadym Koval, Serhii Martsenko, Myroslav Zin (2023). Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.
- 19.Mataifa, H. (2015). Modeling and control of a dual-mode grid-integrated renewable energy system (Doctoral dissertation, Cape Peninsula University of Technology).
- 20.Понтус О.В. Особливості проектування та введення в експлуатацію промислової сонячної електростанції // О.В. Понтус, Р.А. Карпишин, В.П.Коваль / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн.

- націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С 19-21.
21. Bohdan Orobchuk, Oleh Buniak, Ivan Sysak, Serhii Babiuk, Ihor Bodnarchuk, Vadym Koval (2024) Development of Software for the Implementation of Automated Reserve Input Modes Operation. 2nd International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 12-14, Vol. 3742, Pages 316-336
 22. Керя Ю.Б. Роль системи накопичення енергії у електроенергетичній системі //Ю.Б.Керя, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 68
 23. Коваль В.П. Вплив ємності акумулятора на ефективність роботи фотоелектричної станції//В.П.Коваль / Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 16–17 трав. 2024 р. / Нац. акад. наук вищ. освіти України, Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Нац. наук. центр «Ін-т метрології» [та ін.]. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – С. 75-77.
 24. Motapon, S. N., Dessaint, L. A., & Al-Haddad, K. (2013). A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft. IEEE transactions on industrial electronics, 61(3), 1320-1334.
 25. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.
 26. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С. Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000.

— 350 с.

- 27.Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.