

Тернопіль
2025

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Коваль В.П..
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Яремчуку Святославу Івановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Ефективність мікромережі постійного струму для живлення побутових споживачів

Керівник роботи к.т.н., доц. Коваль В.П.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «24» січня 2025 року № 4/7-51.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 20.06.2025

3. Вихідні дані до роботи мікромережа постійного струму напругою 500 В
Служить для живлення побутових споживачів

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

1. Класифікація мікромереж

2. Мікромережі постійного струму

3. Результати та моделювання. Показники продуктивності

4. Результати вимірювань

5. Результати моделювання

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

1. Схема мікромережі постійного струму

2. Система розподілу напруги змінного струму та низької напруги постійного струму

3. Запропонована система постійного струму

4. Напруга інвертора та струм навантаження

5. Результати моделювання

6.

[illegible]

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

(підпис)

Яремчук С.І.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ-42. - Т. : ТНТУ, 2025.

Стор. 59; рис. 20; табл. 4; креслень (презентацій) __; джерел 37.

Метою роботи є запропонувати структуру мікромережі постійного струму та встановити її ефективність в порівнянні із мережою змінного струму. У роботі проведено аналіз результатів досліджень авторів публікацій, щодо ефективності мікромереж постійного струму. Встановлено, що з врахуванням втрат при перетвореннях в системах електропостачання та в самих споживачах, ефективність мікромереж постійного струму є вищою щонайменше на 8 % від змінного струму. На основі аналізу базового прототипу системи електропостачання мікромережі постійного струму, запропоновано 6-кональну систему електропостачання із стабілізацією вихідної напруги на споживачах. Проведені експериментальні вимірювання струмів та напруг у мікромережі постійного струму із фотоелектричною батареєю та споживачами постійного струму. Встановлено, що ККД DC/DC перетворення буде становити 92,5 %. Проведені експериментальні вимірювання струмів та напруг у мікромережі постійного струму із фотоелектричною батареєю та споживачами змінного струму. В цьому випадку використано інвертор для заживлення споживачів змінного струму. Встановлено, що ККД такої системи буде становити 77 %.

Ключові слова: МІКРОМЕРЕЖА, ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ, ПОСТІЙНИЙ СТРУМ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1 Класифікація мікромереж	8
1.1.1 Мікромережі змінного струму	8
1.1.2 Мікромережі постійного струму	9
1.1.3 Гібридні мікромережі	10
1.1.4 Сильні та слабкі сторони системи мікромереж постійного/змінного струму.....	11
1.2 Розвиток систем живлення постійного струму та мікромереж.....	12
1.2.1 Еволюція систем живлення постійного струму	12
1.2.2 Розвиток мікромереж.....	13
1.3 Висновки до розділу	16
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	14
2.1 Концепція мікромереж постійного струму	17
2.2 Порівняння ефективності мікромереж постійного струму з мікромережами змінного струму.....	18
2.2.1 Низьковольтна система розподілу електроенергії змінного струму.....	18
2.2.2 Аналіз роботи мікромереж постійного струму	19
2.3 Прототип мікромережі постійного струму.....	24
2.3.1 Структура	24
2.3.2 Технічні характеристики фотоелектричних панелей	25
2.3.3 Характеристики акумулятора	25
2.3.4 МРРТ-контролер заряду	26
2.4 Блок-схема мікромережі постійного струму	27
2.4.1 Загальна структура.....	27
2.4.1 Фотоелектрична система	28

2.4.2 Вітрогенератор.....	29
2.4.3 Акумуляторна батарея.....	29
2.4.4 Навантаження постійного струму	29
2.4.5 Мережа змінного струму	29
2.5 Процедура збору даних в експериментальних дослідженнях	30
2.6 Стабілізація напруги на навантаженні	30
2.7 Висновки до розділу	43
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	
3.1 Показники продуктивності мікромережевої системи	34
3.2 Результати вимірювань втрат при перетворенні електроенергії із постійної в змінну.....	34
3.2.1 Низьковольтна мікро-система постійного струму.....	34
3.2.2 Традиційна система змінного струму	36
3.2.3 Розрахунок ефективності системи живлення постійного струму	37
3.2.4 Розрахунок ККД традиційної системи змінного струму	38
3.3 Результати моделювання.....	38
3.3.1 Результати в умовах стаціонарного режиму	38
3.3.2 Аналіз результатів з вмиканням двигуна як навантаження.....	42
3.3.3 Аварійні ситуації, які можуть виникати в мікромережі.....	43
3.4 Висновки до розділу	45
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	46
4.1 Класифікація приміщень за небезпекою електротравм	46
4.2 Причини електротравм, напруга кроку.....	47
4.3 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки	49
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	51
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	53

ВСТУП

Актуальність теми.

Більше половини світу все ще потребує електрифікації. Більшість з цих територій знаходяться далеко від електромереж і в такому місці, куди неможливо прокласти електромережу. Через це зростання цих територій суттєво стримується. Цю проблему можна вирішити, використовуючи автономні системи постійного струму (DC) відповідно до потреб цих місць. Основною перевагою використання автономних систем постійного струму є те, що вони можуть житися безпосередньо від відновлюваних джерел енергії. Це гарна можливість розпочати використання технологій відновлюваної енергетики там, де немає доступу до електромережі. Оскільки більшість основних приладів, таких як освітлення, зарядні пристрої для мобільних телефонів тощо, споживають постійний струм, буде легко впровадити технології відновлюваної енергетики, такі як сонячні фотоелектричні батареї, вітрові турбіни та паливні елементи. Акумулятори, що використовуються в таких системах, також потребують постійного струму для зарядки. Тому автономна мікромережа постійного струму підійде для сільської місцевості, де підключення до електромережі є важкодоступним.

Мікромережі постійного струму та міні-мережі набувають все більшого значення останнім часом. Розвинені країни проводять дослідження в цій галузі, щоб внести зміни в електрифікацію будівель. Міні-мережа постійного струму розглядається як життєздатна альтернатива існуючій мережі електрифікації змінного струму завдяки своїм перевагам. Електрифікація постійним струмом розглядається не тільки для сільської місцевості, але й для міських будівель. Електрифікація постійним струмом не є новою ідеєю, оскільки вона використовувалася ще до появи змінного струму, оскільки в давнину електричне навантаження було постійним. Поява складних приладів, таких як кондиціонери, двигуни змінного струму та передачі електроенергії на великі відстані, вплинула на використання електрифікації змінного струму.

Кількість приладів, що працюють на постійному струмі, постійно зростає, і винаходяться все нові й нові. Більшість електронних приладів, які ми використовуємо сьогодні, такі як ноутбуки, комп'ютери, телевізори тощо, потребують постійного струму для своєї роботи. Ці прилади споживають змінний струм і перетворюють його на низьковольтний постійний струм за допомогою адаптерів, передбачених для цих приладів. Цього перетворення можна уникнути, якщо електрифікація здійснюється постійним струмом. Більшість приладів у нашому повсякденному житті споживають постійний струм, наприклад, лампочки, які використовуються протягом тривалого часу. Завдяки технологічному прогресу ми тепер маємо світлодіодні лампи, які працюють шляхом перетворення змінного струму в постійний з достатньою робочою напругою. Однією з основних проблем при перетворенні змінного струму в постійний є пов'язані з цим втрати потужності. Через ці недоліки електричні мережі постійного струму та міні-мережі розглядаються як життєздатний варіант заміни мереж змінного струму та електрифікації в регіонах, що розвиваються

Мета кваліфікаційної роботи: запропонувати структуру мікромережі постійного струму та встановити її ефективність в порівнянні із мережею змінного струму.

Відповідно до даної мети ставляться такі **завдання**:

1. Провести аналіз роботи мікромереж змінного та постійного струму/
2. Провести аналіз результатів досліджень авторів публікацій за тематикою роботи.
3. Запропонувати систему мікромережу підвищеної стабільності.
4. Провести вимірювання втрат у перетворювачах DC/DC та DC/AC.

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Виконана згідно вимог [1]. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 71 арк. формату А4, графічна частина – __ аркушів презентації.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Класифікація мікромереж

1.1.1 Мікромережі змінного струму

У цьому типі мікромереж напруга шини є змінною, тому такі мережі називаються мікромережами змінного струму. Вони включають відновлювані джерела енергії, такі як фотоелектричні та вітрові [2-10], що показано на рисунку 1.1. Шина змінного струму зображена синім кольором і синхронізована з розподільною мережею середньої напруги через обхідний перемикач. Фотоелектричні елементи, що генерують напругу постійного струму, потребують перетворення до відповідного рівня за допомогою переривників постійного струму. Потім вона перетворюється на змінний струм за допомогою інвертора для підключення до шини змінного струму. Аналогічно, коливання напруги змінного струму від вітрогенератора [11-13] перетворюється на постійний струм за допомогою випрямляча, а потім регулюється до необхідного рівня напруги за допомогою інвертора. Акумулятор і маховик виробляють постійний струм для резервного живлення мікромережі змінного струму, який перетворюється на змінний струм за допомогою інвертора. Мікромережа змінного струму має два навантажувальні термінали: термінал чистого постійного струму, що включає мобільні пристрої, вентилятор і персональний комп'ютер, які живляться від шини змінного струму через випрямляч. Зарядний пристрій для електромобілів, що вважається навантаженням постійного струму в мікромережі змінного струму, підключається через випрямляч. Навантаження змінного струму, представлене двигуном змінного струму, не може бути безпосередньо підключене до шини змінного струму через різницю напруг. Тому воно перетворюється на постійний струм за допомогою випрямляча, а потім знову перетворюється на змінний струм за допомогою інвертора для підключення до двигуна змінного струму. Така складність етапів перетворення є характерною рисою мікромереж

змінного струму.

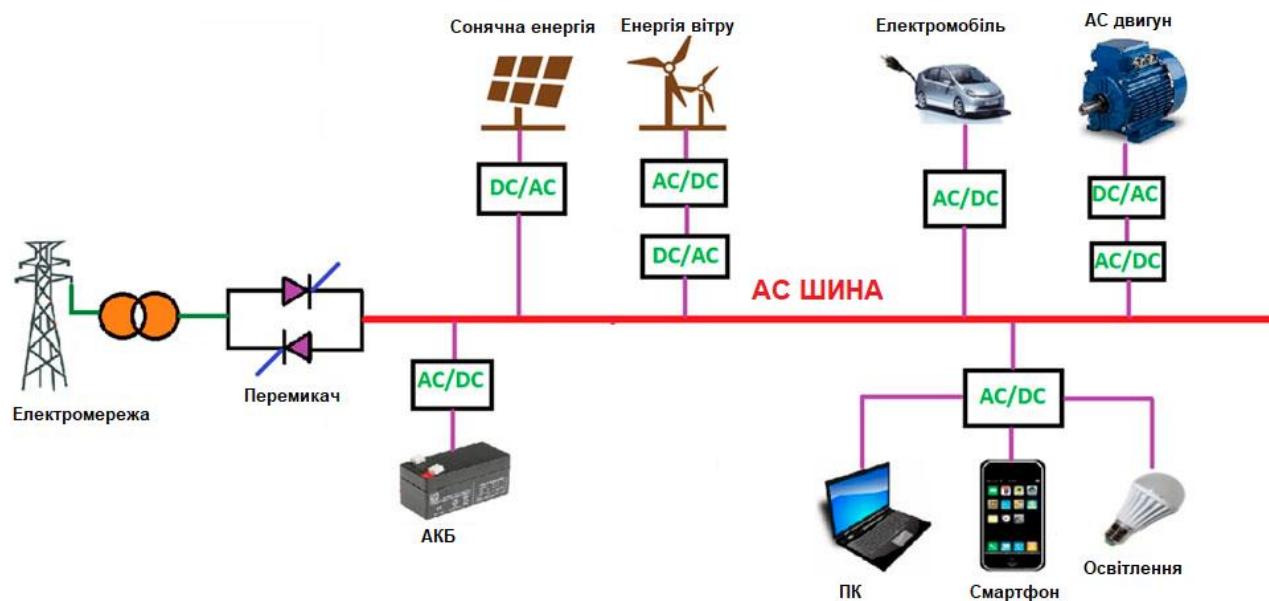


Рисунок 1.1- Схема мікромережі змінного струму

1.1.2 Мікромережі постійного струму

У цьому типі мікромережі напруга шини є постійною, що зумовило її позначення як мікромережі постійного струму. У житлових і комерційних застосуваннях, таких як комп'ютери, зарядні пристрої для акумуляторів і високоефективні системи освітлення, необхідне живлення постійним струмом. Отже, ці прилади потребують перетворення змінного струму в постійний, щоб бути сумісними з традиційним джерелом змінного струму. Багатоступеневе перетворення може знизити надійність і загальну ефективність системи. Однак ці проблеми можна вирішити за допомогою високоефективних перетворювачів постійного струму, які дають можливість безпосередньо підключати пристрої до мережі постійного струму. У мікромережі постійного струму джерела відновлюваної енергії та силова електроніка можуть бути ефективно та раціонально підключені до навантаження шляхом вибору відповідного рівня напруги, що забезпечує меншу кількість етапів перетворення, як показано на рисунку 1.2 [14].

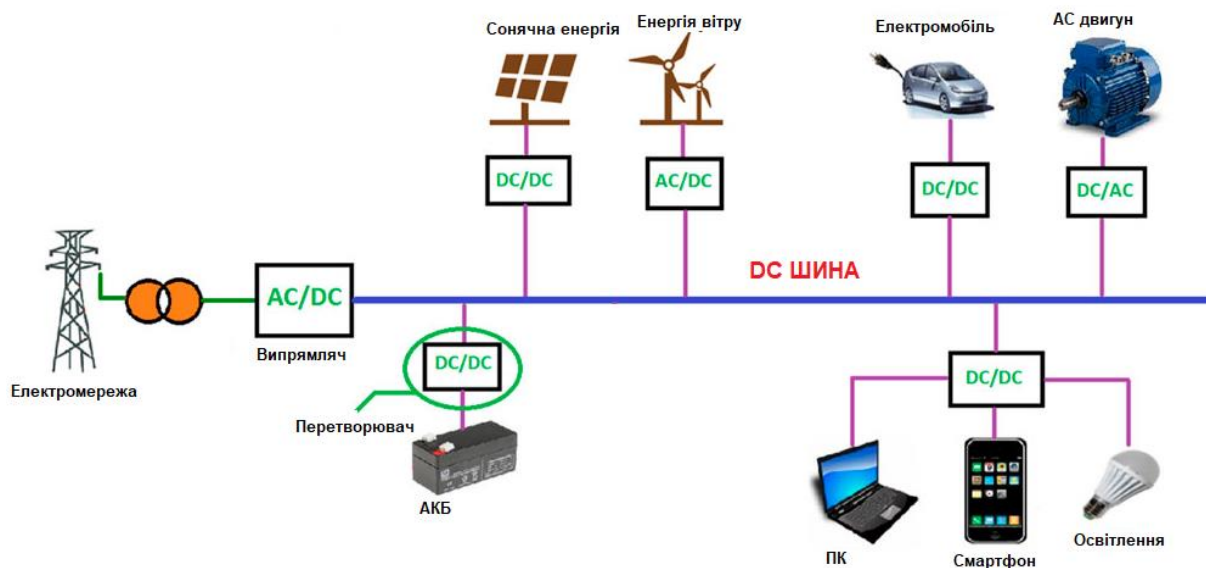


Рисунок 1.2 - Схема мікромережі постійного струму

1.1.3 Гібридні мікромережі

У цій формі мікромережі доступні два різних типи шин: один тип забезпечує напругу змінного струму, а інший — напругу постійного струму [14]. Коли доступні обидва типи генерації від відновлюваних джерел енергії, як показано на рисунку 1.3 [14], така конфігурація найкраще підходить для даного застосування.

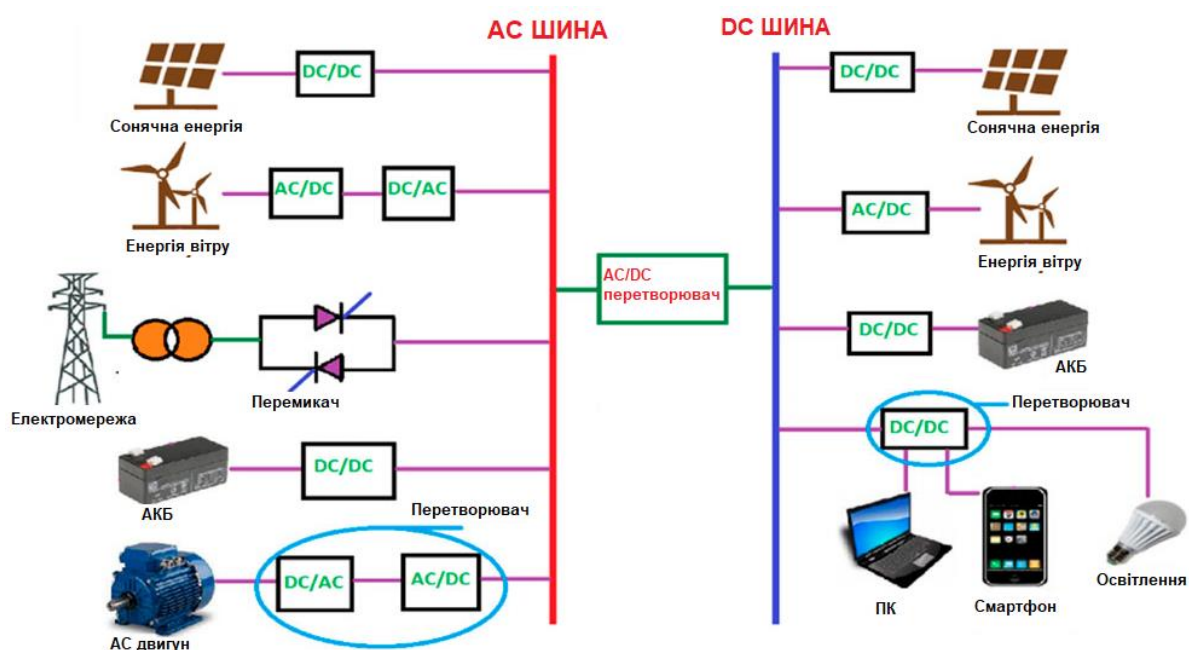


Рисунок 1.3 - Схема гібридної мікромережі.

1.1.4 Сильні та слабкі сторони системи мікромереж постійного/змінного струму

Таблиця 1.1 висвітлює деякі ключові сильні сторони мікромереж постійного струму та слабкі сторони мікромереж змінного струму.

Таблиця 1.1 - Мікромережі постійного струму проти мікромереж змінного струму

Сильні сторони мікромережі постійного струму	Слабкі сторони мікромережі змінного струму
Потрібно менше перетворювачів енергії, що підвищує ефективність	Потрібно більше перетворювачів енергії, що знижує ефективність
Синхронізація частоти не потрібна	Необхідна частотна синхронізація
Навантаження постійного струму можна легко інтегрувати	Навантаження постійного струму можна інтегрувати за допомогою випрямляча, що знижує загальну ефективність системи
Відновлювані джерела енергії (наприклад, сонячні та електричні транспортні засоби) можуть бути інтегровані безпосередньо	Відновлювані джерела енергії (наприклад, сонячні батареї та електромобілі) можуть бути інтегровані за допомогою інвертора, що ще більше знижує ефективність.
Ефективність передачі висока завдяки усуненню втрат, пов'язаних з реактивним струмом	Ефективність передачі низька через наявність реактивного струму

1.2 Розвиток систем живлення постійного струму та мікромереж

1.2.1 Еволюція систем живлення постійного струму

Боротьба між Вестінгаузом і Теслою проти Едісона і Дж. П. Моргана щодо «що буде далі» називається «війною століття» [15]. Обидві сторони усвідомлюють, наскільки цінною з фінансової точки зору буде майбутня інфраструктура електроенергетики [15].

Наприкінці 18 століття, у 1880 році, директор Edison Illuminating Company Томас Едісон розробив невелику електростанцію в Pearl Street Station для постачання споживачам постійного струму для живлення низьковольтних ламп постійного струму. Електроенергія цієї електростанції розподілялася трьома лініями (тобто двополярним розподілом) з рівнями напруги +110 В, 0 і -110 В. Головним недоліком цієї електроенергії було те, що в лініях електропередачі спостерігалася значне падіння напруги, тому передача електроенергії до віддалених районів та інших житлових кварталів, віддалених від головної електростанції, не була прийнятним варіантом. Перетворення напруги не відбувалося, невелика електростанція та навантаження складалися лише з ламп розжарювання та двигунів постійного струму.

У 1886 році Нікола Тесла запровадив концепцію змінного струму, використовуючи трансформатори для зміни рівнів напруги. Дебати посилилися в 1887 році, коли Нікола Тесла зареєстрував кілька патентів у Сполучених Штатах. Патенти базувалися на схемі розподілу змінного струму і підтримувалися компанією Westinghouse Electric and Manufacturing Company. Відкриття Тесли широко вплинули на перевагу системи змінного струму в Битві струмів. У 1893 році Westinghouse виграла контракт на будівництво гідроелектростанції для використання енергії Ніагарського водоспаду і передачі її до Буффало, штат Нью-Йорк. Проект був завершений 16 листопада 1896 року, і змінний струм почав жити промисловість Буффало. Ця віха ознаменувала занепад постійного струму в США, надавши успішний досвід для майбутніх світових проектів передачі та розподілу електроенергії.

У 1880-х роках Едісон доклав значних зусиль для підвищення ефективності системи постійного струму та зменшення втрат у лініях, використовуючи серію електродвигунів-генераторів для створення системи HVDC. Така модель була здатна передавати електроенергію на великі відстані. Однак протягом майже століття система HVDC не була впроваджена через високі витрати на обслуговування та монтаж.

Після винаходу транзистора в 1947 році Джоном Бардіном почалася електронна революція. Винахід високовольтних електронних пристроїв, зокрема, зробив можливим повернення постійного струму, коли відбувся прогрес в області силовій електроніки, були введені перетворювачі постійного струму (тобто Buck, Boost і Buck-Boost). Вони могли перетворювати постійний струм на різні рівні напруги відповідно до вимог пристроїв. Це був час, коли постійний струм мав перевагу над змінним. Постійний струм почав використовуватися в галузі генерації за допомогою відновлюваних джерел енергії, тобто сонячної, паливних елементів тощо. Згенерований постійний струм передається на великі відстані за допомогою високовольтних ліній електропередачі постійного струму.

1.2.2 Розвиток мікромереж

Мікромережі були вперше запроваджені в 2001 році Бобом Лассетером, який очолював панель IEEE PES WM, про що свідчить звіт CERTS [16] у 2002 році. Наразі провідні країни світу, зокрема США, Європейський Союз, Японія та Китай, проводять дослідження в галузі мікромереж.

Консорціум з технологій надійності електропостачання (CERTS) у США є відомим інститутом, що займається дослідженнями в галузі мікромереж. Він запровадив новаторську концепцію мікромереж у білій книзі під назвою «Концепція мікромереж», підготовленій для Каліфорнійської комісії з енергетики та Міністерства енергетики США. CERTS Micro Grid розробила концепцію peer-to-peer із стратегіями plug-and-play, яка була успішно

продемонстрована на випробувальному стенді з American Electric Power. Компанія Northern Power Systems (NPS) реалізувала установку мікромережі в MAD RIVER, Вайтсфілд, Вермонт, з центральним контролером мікромережі. У системі Boston Bar компанії British Columbia Hydro ефективно використовується одна велика електростанція для контролю поведінки підсистеми мережі за допомогою Micro Grid Control. General Electric Corporation проводить польові випробування своєї концепції мікромереж і активно працює над розробкою системи управління енергією мікромереж.

В Європейському Союзі реалізовано великі проекти з мікромереж, зокрема проект MicroGrid та проект More MicroGrid, з метою використання відновлюваних джерел енергії [17-20] та покращення їх використання для вдосконалення мікромереж. Проект Micro Grid пов'язаний з концепціями, завданнями та лабораторними випробуваннями, а в рамках проекту More Micro Grid було розроблено сім пілотних установок, а перше застосування розподіленого генератора також було реалізовано в мікромережах на острові Кітнос. Мікромережа Кітнос була побудована на острові Кітнос і забезпечує електроенергією 12 будинків у невеликій долині. У Мілані було розроблено низьковольтну мікромережу (CESI Test Facility), яка синхронізована з середньовольтовою мережею для випробування технологій розподіленого генератору [21]. Ця система використовується в рамках проекту More Microgrid.

Дослідницький інститут Labein в Іспанії створив тестову систему для досліджень розподіленого генератору та мікромереж (Labein Microgrid) [21]. Португальська електроенергетична компанія (EDP Feeder) модернізує віддалену частину невеликої комерційної радіальної лінії електропередачі з метою проведення досліджень мікромереж [21]. Спільно з EMforce та Germanos, Continuoon модернізувала курортний парк, який вона управляє в Нідерландах, перетворивши його на мікромережу (Continuoon Holiday Park microgrid). У першому проекті мікромереж ЄС було використано об'єкт Demotec в ISET у Касселі для розробки методології управління розподіленим виробництвом у мікромережах [21]. У Мангаймі, Німеччина, мережа підстанцій, підключених

до штаб-квартири MVV, була визначена MVV як місце для дослідження мікромереж. Корпорація Shimizu побудувала пілотну та великомасштабну мікромережу в своїх дослідницьких лабораторіях у Токіо (Shimizu Extended Microgrid) [21]. Проект «Регіональна енергомережа з використанням відновлюваних джерел енергії», ініціатива Організації з розвитку нових енергетичних та промислових технологій (NEDO), розпочав три демонстраційні проекти.

- Система Хачінохе; цей проект є результатом співпраці між містом Хачінохе, Дослідницьким інститутом Mitsubishi та компанією Mitsubishi Electric [21];. Ця система включає фотоелектричні елементи, вітрогенератори, акумуляторні батареї та три великі газові двигуни, що працюють на стічних водах та відпрацьованих газах.

- Мікромережа Сендай була впроваджена Організацією з розвитку нових енергетичних та промислових технологій у 2004–2008 роках на основі фотоелектричних генераторів, паливних елементів та двох газових двигунів. Цей проект мікромережі продемонстрував свою ефективність, особливо під час руйнівного землетрусу в районі Тохоку 11 березня 2011 року.

- У 2006 році Університет Цінхуа розпочав дослідження в галузі мікромереж, використовуючи обладнання Державної ключової лабораторії та побудувавши експериментальну платформу для мікромереж з генерацією відновлюваної енергії, пристроями для зберігання енергії та навантаженнями.

- У 2007 році Центр досліджень фотоелектричної енергетики Технологічного університету Хефей побудував невелику електромережу, що використовує сонячну та вітрову енергію і може працювати як незалежна мікромережа.

- Китайська академія наук побудувала тестову мікромережу потужністю 200 кВт та проаналізувала її стаціонарний та динамічний стан.

1.3 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз мікромереж змінного та постійного струму та гібридних мікромереж. Розглянуто їх переваги та недоліки та ситуації коли можна їх використовувати.
2. Встановлено, що в мікромережах постійного струму потрібно менше перетворювачів енергії, що підвищує їх ефективність, а відновлювані джерела енергії (наприклад, сонячні та електричні транспортні засоби) можуть бути безпосередньо в них інтегровані.
3. Розглянуто розвиток систем постійного струму та мікромереж як в історичному так і в географічному аспекті.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Концепція мікромереж постійного струму

Концепція мікромереж постійного струму, інтегрованих з відновлюваними джерелами енергії, набула значного значення завдяки прогресу в сучасній силовій електроніці та зростанню усвідомлення необхідності екологічно чистого виробництва електроенергії, зокрема у формі постійного струму (наприклад, сонячна енергія, паливні елементи, суперконденсатори та акумуляторні батареї). Ці мікромережі демонструють підвищену ефективність завдяки прямому живленню навантажень постійного струму, що усуває необхідність у декількох етапах перетворення і відрізняє їх від традиційних мікромереж змінного струму. Крім того, інтеграція згаданих відновлюваних джерел відбувається без додаткових процесів перетворення. Комерційні застосування, що передбачають використання схем розподілу постійного струму низької напруги, такі як електромобілі [22,23], телекомунікаційні системи та суднові енергосистеми. Розширення розподілених джерел енергії, таких як сонячна та вітрова, та їх інтеграція в мікромережі постійного струму вимагає стабільної роботи та належних механізмів захисту.

У різних статтях показано, що мікромережі постійного струму відіграють ефективну роль у вирішенні експлуатаційних проблем в основній мережі. У [24] мікромережа постійного струму, що включає фотоелектричну генерацію та систему акумулювання енергії в акумуляторах, була використана для пом'якшення великих нелінійних навантажень. Експериментальні дані, представлені в [24], демонструють, що мікромережі постійного струму можуть широко застосовуватися для підтримки напруги, використовуючи можливість введення реактивної потужності як допоміжної послуги. У [25] деякі автори продемонстрували, що зменшення кількості ступенів перетворення інверторів у мікромережах постійного струму між навантаженням постійного струму та виходом постійного струму робить систему більш ефективною.

2.2 Порівняння ефективності мікромереж постійного струму з мікромережами змінного струму

2.2.1 Низьковольтна система розподілу електроенергії змінного струму

Зазвичай більшість пристроїв, що використовуються в побуті, такі як ноутбуки та мобільні телефони, працюють від постійного струму для заряджання. Однак у побуті зазвичай використовується змінний струм. Отже, необхідний двоступеневий процес перетворення – спочатку змінного струму в постійний, а потім знову з постійного струму в форму, сумісну з приладом, як показано на рисунку 2.1. Цей подвійний процес перетворення призводить до загального зниження ефективності. Випрямлячі, які є важливим компонентом цього перетворення, мають вищі втрати.

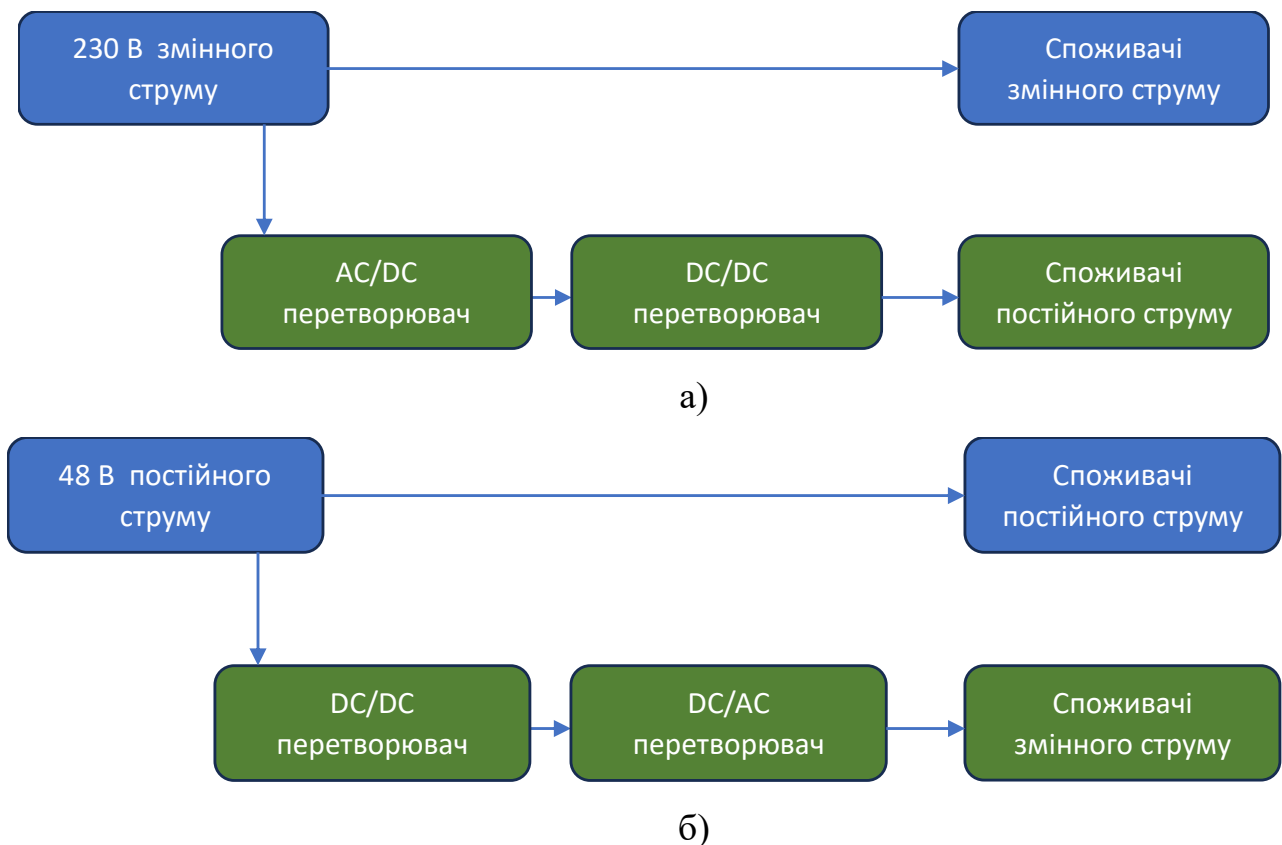


Рисунок 2.1 - Система розподілу напруги змінного струму (а) та низької напруги постійного струму (б).

2.2.2 Аналіз роботи мікромереж постійного струму

Розглянемо систему розподілу низької напруги, що працює на 48 В постійного струму. Ця система є доброю для приладів, які для своєї роботи потребують постійного струму. Ці прилади можна підключити безпосередньо або через перетворювач постійного струму в разі невідповідності рівнів напруги, як показано на рис.2.1 вище. Однак побутові прилади зазвичай працюють від змінного струму. Якщо електроенергія генерується за допомогою фотоелектричної системи, яка виробляє постійний струм, її необхідно перетворити на змінний струм за допомогою інвертора. Було виявлено, що інвертор має менші втрати в порівнянні з випрямлячем. Для обчислення ККД розподільних систем LVAC і LVDC мережі моделюються в програмному забезпеченні PSCAD. На основі вхідної та вихідної потужності кожного перетворення, ефективність на кожному етапі складається з випрямляча та переривника для системи LVAC, а для системи LVDC – з переривника та інвертора. З результатів моделювання PSCAD [26] було виявлено, що загальна ефективність перетворення системи LVAC складається з ефективності випрямляча та переривника. Отже, загальна ефективність перетворення системи LVAC становить 78,24%, а для системи LVDC – 84,6%.

У [26] моделюється система розподілу LVDC за допомогою програмного забезпечення EMTP з рівнем напруги постійного струму 380 В на шині постійного струму. Моделі змінного та постійного струму підключені через шину постійного струму, як показано на рис.2.2, і отримано потужність на кожному етапі перетворення.

У цій системі LVDC передбачається, що електроенергія генерується фотоелектричними модулями, подібними до постійного струму. Далі вона поділяється на моделі змінного та постійного струму.

- Модель змінного навантаження, що складається з випрямляча, понижуючого перетворювача та навантаження постійної потужності, яке в основному є навантаженням постійного струму. Тут змінний вхідний струм

надходить від інвертора.

- Модель постійного навантаження, що складається з понижуючого перетворювача та навантаження постійної потужності, яке в основному є навантаженням постійного струму. Тут постійний вхідний струм надходить від шини постійного струму.



Рисунок 2.2 - Система розподілу LVDC

Розглядаючи модель змінного струму з двома ступенями перетворення потужності, ККД розраховується на кожному ступені перетворення, включаючи 75% ККД випрямляча та 91% ККД інвертора. Це дає загальний ККД 68,25%.

Розглядаючи модель постійного навантаження, є один етап перетворення. Отже, загальний ККД в основному дорівнює ККД перетворювача. Загальний ККД системи з постійним навантаженням становить 90,44%. З результатів моделювання було виявлено, що ККД моделі змінного навантаження знижується. Модель змінного навантаження містить три перетворювачі потужності, а саме інвертор, випрямляч і понижуючий перетворювач. Через ці багаторазові перетворення система LVDC не підходить для моделі змінного струму. Натомість у моделі постійного струму потрібен лише один стабілізатор напруги, тобто понижуючий перетворювач, тому її можна надійно використовувати для моделі постійного струму з системою розподілу LVDC.

Порівняємо ефективність мікромереж змінного та постійного струму з використанням гібридних систем відновлюваної енергії сонця та вітру.

Моделюємо дві системи: одна для системи змінного струму, а інша для системи постійного струму, яка є, по суті, розширенням системи змінного струму. На рис.2.3 показано, що відновлювані джерела підключені до загальної шини змінного струму, яка живиться від вітрогенератора потужністю 5 кВт і сонячних панелей потужністю 5,3 кВт. Вітрогенератор підключений безпосередньо до шини змінного струму, а сонячна панель підключена через інвертор до шини змінного струму. У системі змінного струму навантаження є статичним з номінальною потужністю 8 кВт; аналогічно, в системі постійного струму за допомогою випрямляча створено дві шини змінного та постійного струму, а статичне навантаження постійного струму використовується з номінальною потужністю 8 кВт. Проводиться аналіз потоку потужності, який дає рівні напруги і втрати в гілках для обох шин в залежності від рівного навантаження на обидві шини. Було виявлено, що падіння напруги в шині змінного струму дещо збільшується в порівнянні з шиною постійного струму, а система змінного струму має більші втрати в порівнянні з системою постійного струму.

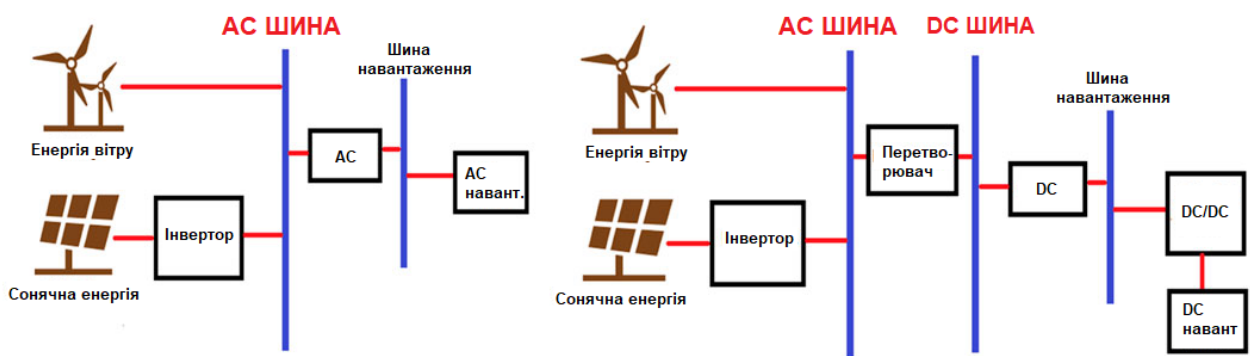


Рисунок 2.3 - Мікромережа змінного струму з сонячною та вітровою енергією разом з розширенням для системи постійного струму

У [27] розподільні лінії змінного та постійного струму були порівняні з точки зору ефективності з урахуванням таких параметрів, як опір та реактивний опір. З порівняльного аналізу, проведеного в [27], було виявлено, що з точки зору здатності передачі потужності лінія постійного струму має менші втрати в

порівнянні з лінією змінного струму, отже, загальна ефективність системи постійного струму покращується в порівнянні з системою змінного струму.

У [28] було проаналізовано сумісність побутових приладів, що живляться змінним та постійним струмом. Було проведено вимірювання енергії для перевірки профілю потужності кондиціонера з інверторним приводом в умовах експлуатації, при нормальному живленні змінним струмом та запропонованому живленні постійним струмом 310 В. Результати показують, що такий кондиціонер споживає до 11,466 кВт·год на добу, що включає перетворення постійного струму в змінний (інвертор) для навантаження джерела постійного струму-інвертор, але коли такі кондиціонери безпосередньо підключені до джерела постійного струму-навантаження, споживання електроенергії на добу становить до 9,850 кВт·год.

Щоб продемонструвати ефективність запропонованої схеми (прилади з джерелом постійного струму) порівняно з традиційною (прилади з джерелом постійного струму та інвертором) на основі економії енергії, запропонована шина постійного струму є ефективною завдяки дещо меншому споживанню енергії, ніж традиційна система змінного струму. Таким чином, для системи постійного струму було досягнуто значного зниження енергоспоживання, що робить її більш надійною та ефективною.

У [28] проведено порівняльний аналіз гібридних мереж на фотоелектричній системі, що використовує мережі змінного та постійного струму, які постачають електроенергію до домогосподарств. Аналіз проведено з використанням ефективності перетворювачів потужності для обчислення втрат потужності в кожному перетворювачі. Використання мережі постійного струму в кінцевому підсумку зменшує втрати при перетворенні змінного струму в постійний і навпаки. З огляду на ефективність мереж змінного та постійного струму можна зробити висновок, яка система є надійною та ефективною для фотоелектричної генерації та може бути синхронізована з основною мережею електропостачання. Як було виявлено, ефективність мережі змінного струму становить 90,13%, тоді як ефективність мережі постійного струму досягає

93,20%. Отже, на основі цього аналізу було встановлено, що продуктивність мережі постійного струму є кращою за умови зміни навантаження порівняно з системою мережі змінного струму.

Дослідження, проведене в [29], зосереджується на порівнянні енергоефективності мікромереж змінного та постійного струму. Автори досліджують три різні режими живлення. Вони аналізують сценарії розподілу, включаючи компоненти, навантаження та фотоелектричну генерацію електроенергії. Результати показують, що розподіл постійного струму має переваги над розподілом змінного струму, з загальним підвищенням ефективності на 6,5–7,9%. Автори в [29] надають цінну інформацію щодо аналізу стабільності мікромережі постійного струму, підключеної до відновлюваних джерел енергії. Автори в [29] дослідили мікромережу постійного струму з шістьма клемами в моделюванні та застосували методи регулювання навантаження. Запропонований метод був добре досліджений і випробуваний в умовах моделювання в різних сценаріях, але необхідно проаналізувати систему під час симетричних і асиметричних збоїв. У [30] представлено фотоелектричну мікромережу постійного струму, розроблену з використанням стратегії управління для оптимізації використання енергії та забезпечення стабільності на основі дискретної моделі відображення часу для аналізу стабільності. Запропонований метод збільшив обчислювальне навантаження. Було розроблено та змодельовано автономну сонячну мікромережу. Компоненти системи, включаючи однофазний інвертор постійного струму в змінний, підвищувальні перетворювачі постійного струму, стан розряду акумулятора та стан резервного живлення, було проаналізовано за допомогою моделювання. За допомогою моделювання було проаналізовано різні випадки автономної сонячної мікромережевої системи для перевірки достовірності моделей. Однак бракує апаратного прототипу та порівняння ефективності. У [31] автор представляє автономну сонячну фотоелектричну систему з мікромережею постійного струму, що включає такі компоненти, як підвищувальний перетворювач постійного струму, методи MPPT,

двонаправлений перетворювач постійного струму, інвертор постійного струму в змінний та акумулятори. Їхньою головною метою було порівняння технологій ММРТ, але в їхній системі відсутнє порівняння ефективності та обґрунтування переваг систем постійного струму для віддалених районів. Автори досліджували острівну мікромережу постійного струму на основі технології МРС з декількома складними контурами струму та напруги для підтримки стабільності системи, але необхідно проаналізувати кілька сценаріїв навантаження та різні сценарії несправностей.

2.3 Прототип мікромережі постійного струму

2.3.1 Структура

Фізичний прототип мікромережі постійного струму складається з фотоелектричних панелей, акумуляторних батарей [32-35], контролера заряду МРРТ та навантажень постійного струму. Конкретний рівень напруги для мікромереж постійного струму, що використовуються для електрифікації сільських районів, обрано 60 В. На рис. 2.4 та 2.5 показано запропоновану та традиційну системи живлення постійного та змінного струму відповідно.

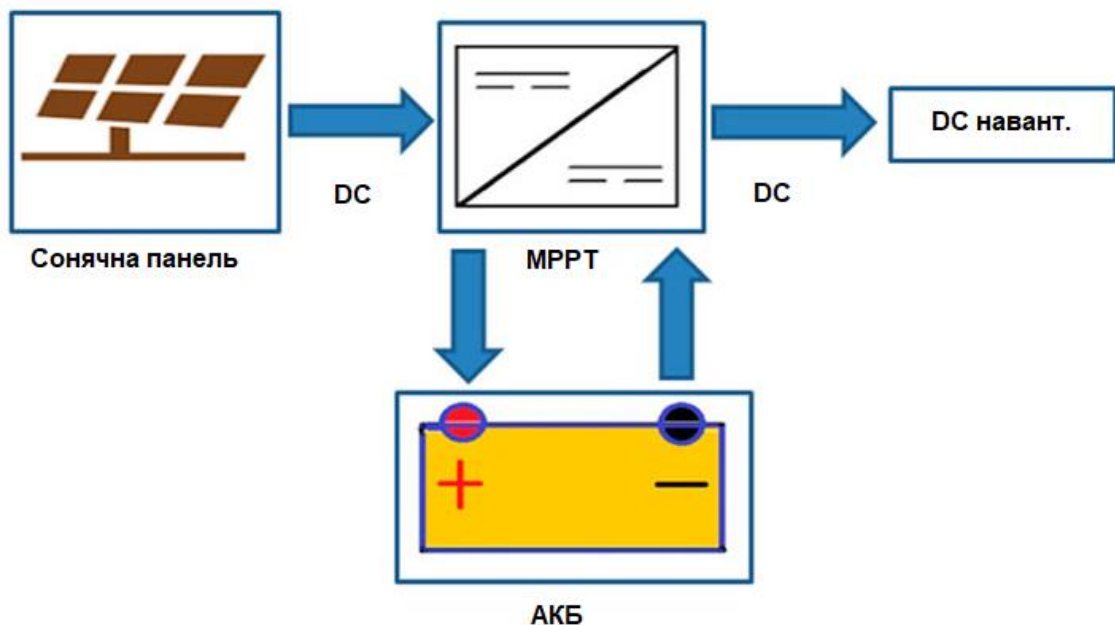


Рисунок 2.4 - Запропонована система постійного струму.

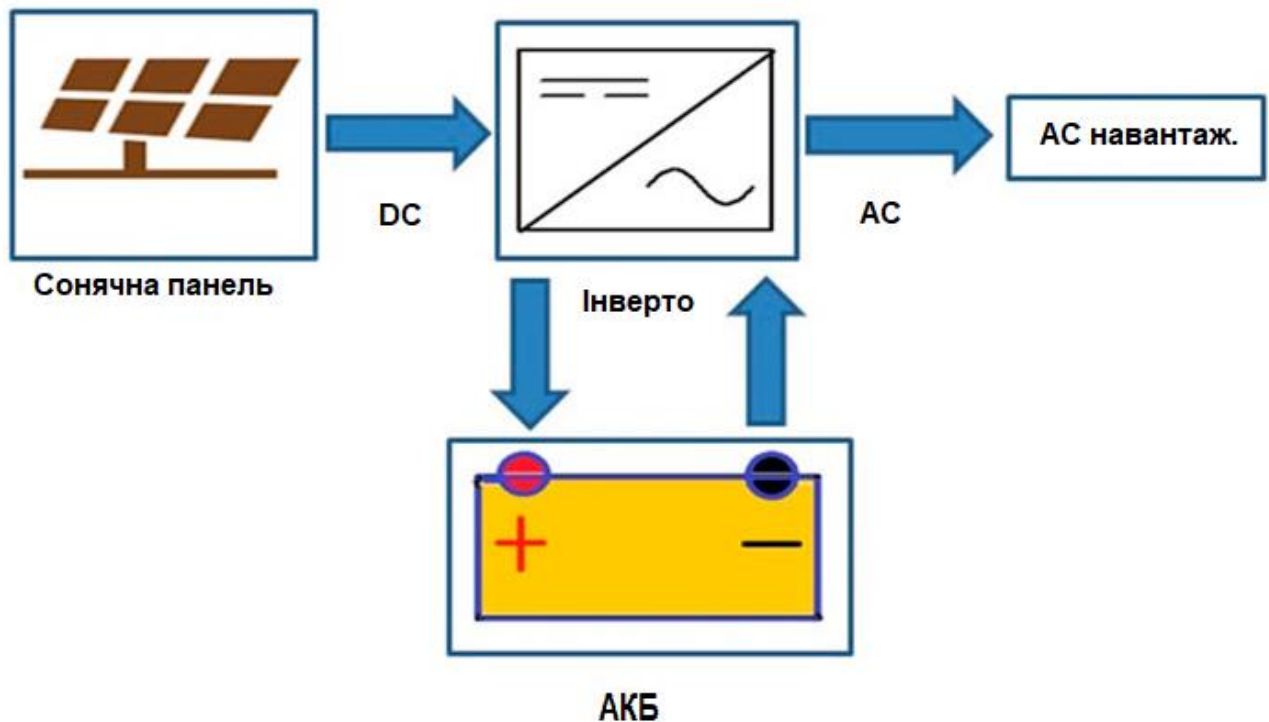


Рисунок 2.5 - Традиційна система змінного струму

2.3.2 Технічні характеристики фотоелектричних панелей

У цій роботі використовувалася фотоелектрична панель STP250-20/Wd. Для аналізу було використано чотири сонячні модулі, з'єднані послідовно-паралельно.

Перше електричне коло містить дві сонячні панелі, з'єднані послідовно, що дає $30,7 \text{ В} + 30,7 \text{ В} = 61,4 \text{ В}$ і $8,15 \text{ А}$. Друге електричне коло має таку саму конфігурацію, що й перше, але з'єднане паралельно з першим, що збільшує номінальний струм до $8,15 \text{ А} + 8,15 \text{ А} = 16,30 \text{ А}$. Отже, загальна потужність становить

$$61,4 \text{ В} \cdot 16,30 \text{ А} = 1000,68 \text{ Вт} = 1 \text{ кВт.}$$

2.3.3 Характеристики акумулятора

У системі живлення використовується акумулятор типу AGM (Absorbed

Glass Mat). Два акумулятори використовуються в паралельному з'єднанні; номінальні характеристики одного акумулятора та загальні характеристики акумуляторної батареї наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Характеристики акумулятора

Мінімальна робоча температура	-40 град.
Ступінь захисту	IP65
Напруга	24 В
Напруга холостого ходу	37,4
ВККД,	не менше 15.4 %
Максимальна робоча температура	85 град.
Країна виробник	Китай
Гарантійний термін	60 міс
Напруга при максимальній потужності	30,7 В
Потужність	250 Вт
Струм короткого замикання	8,63 А
Виробник	Suntech
Матеріал рамки	Алюміній
Струм при максимальній потужності	8,15 А
Кількість елементів	60 шт.
Тип панелі	Полікристалічна

2.3.4 MPPT-контролер заряду

Мета використання MPPT-контролера заряду полягає в тому, щоб фотоелектричні панелі працювали в точці максимальної потужності для отримання максимальної потужності. Вироблення енергії за допомогою сонячної енергії перевищує рівень напруги акумуляторної батареї, тому

контролер заряду MPPT перетворює надлишкову сонячну напругу в силу струму для швидкого заряджання акумуляторів.

2.4 Блок-схема мікромережі постійного струму

2.4.1 Загальна структура

Фізична схема прототипу 4-канальної мікромережі постійного струму була розширена до шести каналів у середовищі моделювання, як показано на рис.2.6. Номінальні параметри мікромережі наведені в таблиці 2.2.

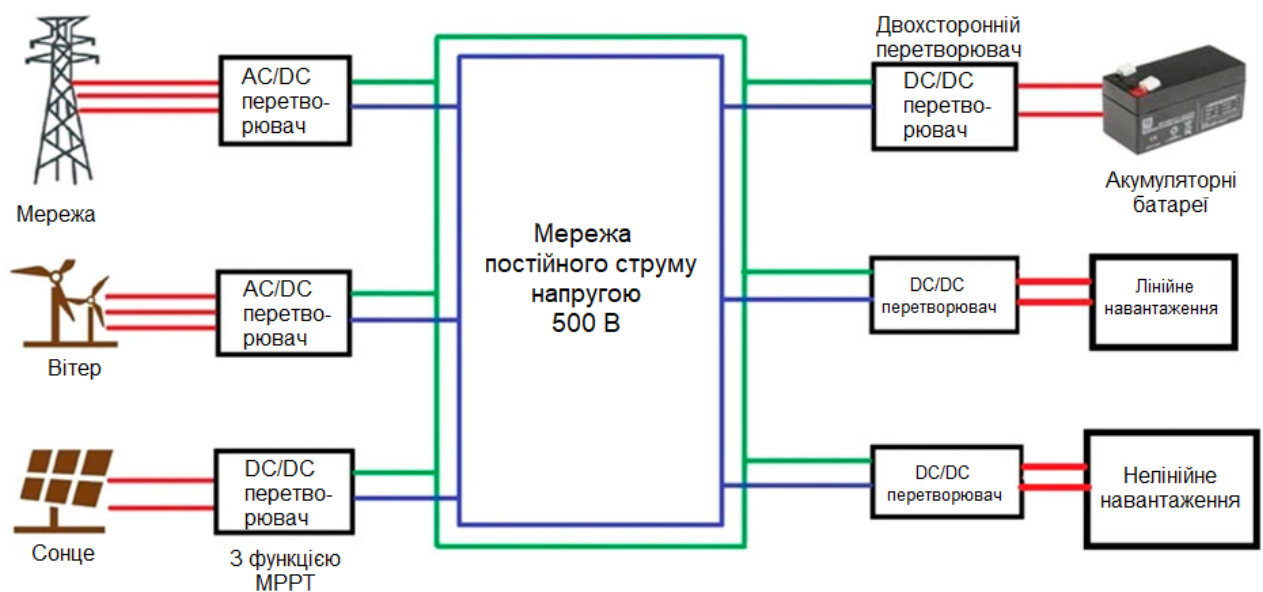


Рисунок 2.6 - Схема мікромережі постійного струму з шістьма каналами

Таблиця 2.2 – Характеристики мікромережі

Компоненти	Значення
Напруга на шині мікромережі постійного струму	500 В
Потужність сонячних панелей	250 Вт
Напруга сонячних панелей	30,7 В
Струм сонячних панелей	8,15 А
Послідовно-паралельне комбіноване живлення	20 кВт

Послідовно-паралельна комбінована напруга	245 В
Послідовно-паралельний комбінований струм	81 А
Рівень напруги акумуляторної батареї	48 В
Резервна ємність акумуляторної батареї	100 А · год
Напруга навантаження постійного струму	300 В
Потужність навантаження постійного струму	5 кВт
Енергія вітрових турбін	10 кВт
Трифазна напруга мережі змінного струму	220 В

2.4.1 Фотоелектрична система

Фотоелектричний модуль, використаний у цій системі, є таким самим, як і в прототипі, з невеликою зміною номінальної напруги мікромережі постійного струму, яка була обрана як 500 В постійного струму, а номінальна потужність була збільшена до 20 кВт.

Спочатку в одному колі фотоелектричних систем використовується вісім модулів, з'єднаних послідовно, що дає $30,7 \text{ В} \cdot 8 = 245,6 \text{ В}$ постійного струму і 8,15 А. Таким чином, отримується система потужністю лише 2 кВт. Використовуючи послідовне з'єднання кіл, створюється 90 інших кіл, і в цілому паралельно використовується десять кіл, що дає 245,6 В постійного струму і 81,5 А. Загальна потужність тепер становить $245,6 \text{ В} \cdot 81,5 \text{ А} = 20\,016,4 \text{ Вт} = 20,01 \text{ кВт}$. Для досягнення 500 В постійного струму використовується підвищувальний перетворювач з алгоритмом MPPT. Переважним алгоритмом MPPT, що використовується в моделюванні, є метод інкрементальної провідності.

2.4.2 Вітрогенератор

Вітрогенератор, інтегрований в мікромережу постійного струму, має номінальну потужність 10 кВт. Спочатку вітрогенератори генерують змінний струм, оскільки в моделюванні використовується синхронний генератор з постійними магнітами. Отже, для перетворення змінного струму в постійний, контролер розроблений для роботи в режимі випрямляча, який перетворює трифазну змінну напругу в постійну напругу до 500 В постійного струму.

2.4.3 Акумуляторна батарея

Акумуляторна батарея додається всередину системи для забезпечення надійності та стабільності системи. Основна мета використання акумуляторної батареї – підтримувати потік енергії, стабілізувати напругу та генерувати максимальну потужність.

2.4.4 Навантаження постійного струму

Навантаження постійного струму, на яке орієнтована симуляційна середа, є лінійним і нелінійним. Номінальна напруга резистивного навантаження постійного струму становить 300 В, тому для отримання 300 В з 500 В постійного струму використано понижуючий перетворювач. У нелінійних навантаженнях додається двигун постійного струму; використовується та сама номінальна напруга понижуючого перетворювача.

2.4.5 Мережа змінного струму

Трифазна мережа змінного струму також підключена до пропонованої мікромережі постійного струму. Спочатку отримуються напруги змінного струму, але для їх інтеграції з мікромережею постійного струму напруги

змінного струму необхідно перетворити на постійну за допомогою перетворювача, що працює в режимі випрямляча.

2.5 Процедура збору даних в експериментальних дослідженнях

Вона включає чотири етапи, наведені нижче:

1. Визначення показників

Сюди входять конкретні показники ефективності, такі як ефективність, стабільність, час відновлення після несправності та надійність.

2. Налаштування приладів

Це включає правильну установку точних вимірювальних приладів як в системах мікромереж постійного струму, так і змінного струму. Слід переконатися, що обидві системи налаштовані однаково, і перевірити кожен систему окремо.

3. Збір даних

Проведіть кілька сесій тестування при зміні навантаження і безперервно записуйте дані.

4. Аналіз даних

Розрахуйте ефективність і перевірте результати, спостерігаючи за стабільністю.

2.6 Стабілізація напруги на навантаженні

Для управління налаштуванням коефіцієнтів підсилення в реальному часі замість простого PI в цьому дослідженні використовується адаптивний PI-регулятор, який базується на плануванні коефіцієнтів підсилення, тому він має динамічне регулювання коефіцієнтів підсилення.

Для забезпечення стабільності напруги на кожному виводі постійного струму встановлено окремі PI-регулятори. Якщо напруга на виводах навантаження відхиляється від заданого значення, відповідні регулятори

регулюють вихідну напругу перетворювачів постійного струму для підтримки оптимального рівня напруги. Наприклад, як показано на рисунку 3.9, коли двигун запускається через 1,5 с, регулятор намагається підтримувати стабільний рівень напруги на навантаженні, який повинен бути постійним і дорівнювати 300 В.

Детальне порівняння запропонованого підходу PI-контролера з іншими відповідними алгоритмами управління, які зазвичай використовуються в мікромережах постійного струму. У таблиці 2.3 наведено порівняльний аналіз PI, PID і MPC алгоритмів стабілізації напруги.

Незважаючи на існування новітніх підходів, PI-регулятор [36] залишається актуальним з кількох причин.

- Надійність: PI-регулятор менш чутливий до змін параметрів, що робить його придатним для практичного застосування.
- Стабільність: у багатьох реальних сценаріях стабільність і точність у стаціонарному режимі мають вирішальне значення, і PI-регулятор виявляє себе з найкращого боку в цих аспектах.
- Простота: Для невеликих мікромереж постійного струму або застосувань з обмеженими обчислювальними ресурсами PI-регулятор забезпечує баланс між продуктивністю та простотою.

Використаний PI-регулятор включає обробку невизначеності за допомогою динамічного регулювання коефіцієнта підсилення. Сценарій було розглянуто таким чином, що, згідно з рис.3.9, коли двигун запускається, внутрішній регулятор намагається підтримувати та стабілізувати напругу навантаження, яка становить 300 В, але загалом напруга на шині має скачок при запуску двигуна, який зникає і стабілізується. Це показує, що система має здатність обробляти невизначеність.

Таблиця 2.3 - Порівняльний аналіз PI, PID і MPC для розробленої мікромережі постійного струму

Підхід до управління	Переваги	Обмеження
PI	Легко впроваджувати та налаштовувати	Нездатність впоратися зі складною динамікою
	Забезпечує стабільне керування без агресивних коливань	
	Добре працює на різних об'єктах керування	
PID	Швидка реакція на зміни	Може демонструвати перерегулювання та коливання, якщо не налаштований належним чином
	Краща обробка збурень	Потребує ретельного налаштування трьох параметрів
MPC	Оптимізація предиктивного управління на горизонті	Вимагає значних обчислювальних ресурсів
	Обробляє декілька змінних збурень	Складніша у впровадженні, ніж PI або PID

2.7 Висновки до розділу

1. Встановлено, що мікромережі постійного струму відіграють ефективну роль у вирішенні експлуатаційних проблем в основній мережі.
2. Проаналізовано базову систему розподілу низької напруги (прототип), що працює на 48 В постійного струму. Встановлено, що ККД системи з постійним навантаженням становить 90,44%. Натомість ККД системи змінного струму з двома ступенями перетворення, складає біля 68,25%.
3. Проведено аналіз результатів досліджень авторів щодо ефективності мікромереж постійного струму. Встановлено, що з врахуванням втрат при перетвореннях в системах електропостачання та в самих споживачах, ефективність мікромереж постійного струму є вищою щонайменше на 8 % від змінного струму.
4. На основі аналізу базового прототипу системи електропостачання мікромережі постійного струму, запропоновано 6-канальну систему електропостачання із стабілізацією вихідної напруги на споживачах.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Показники продуктивності мікромережевої системи

Показники продуктивності запропонованої системи наступні:

1) Загальна ефективність системи

Це стосується розрахунку ефективності мікромереж постійного та змінного струму, яка є відношенням спожитої потужності до доступної електричної потужності. Виражається у відсотках.

2) Перетворення енергії

Це стосується окремих процесів перетворення для обох систем, таких як перетворення постійного струму в змінний у мікромережі змінного струму та перетворення постійного струму в постійний у мікромережі постійного струму.

Показники продуктивності запропонованої системи базуються на:

- Стабільність напруги

Здатність запропонованої мікромережі постійного струму підтримувати стабільний рівень напруги постійного струму на своїх клеммах за різних умов навантаження. Стабільна напруга постійного струму забезпечує надійність для підтримки спеціальних умов експлуатації.

- Час відгуку

Швидкість, з якою система мікромережі постійного струму реагує на зміну навантаження або умов навколишнього середовища, є вирішальною для підтримки стабільності та ефективності в динамічних умовах експлуатації.

3.2 Результати вимірювань втрат при перетворенні електроенергії із постійної в змінну

3.2.1 Низьковольтна мікро-система постійного струму

На рис. 3.1, 3.2 показано напругу і струм фотоелектричної батареї та напругу і струм акумулятора відповідно.



Рисунок 3.1- Напруга та струм фотоелектричної батареї



Рисунок 3.2 - Напруга та струм акумулятора

Загальна номінальна потужність аналізованого навантаження системи освітлення постійного струму становить

$$7 \text{ Вт} \cdot 8 \text{ ламп} = 56 \text{ Вт}$$

Вхідна напруга від сонячної батареї рівна 61,9 В.

3.2.2 Традиційна система змінного струму

Для вимірювання ефективності традиційної системи змінного струму освітлювальні навантаження змінного струму працювали за допомогою інвертора, що живиться від джерела постійного струму.

Спочатку акумулятор було підключено до інвертора, вхідна напруга акумулятора становила 12,19 В, як зазначено на рис. 3.3.

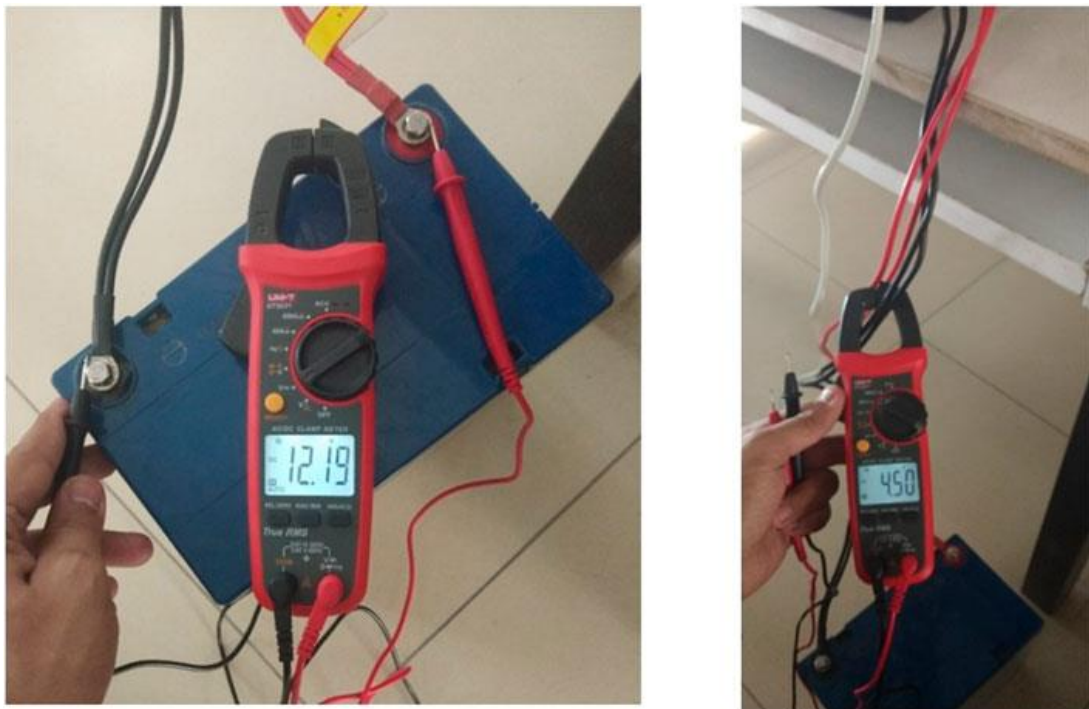


Рисунок 3.3 - Напруга та струм акумулятора

На рис.3.4 нижче показано напругу інвертора та струм навантаження, які були виміряні за допомогою струмовимірювальних кліщів.

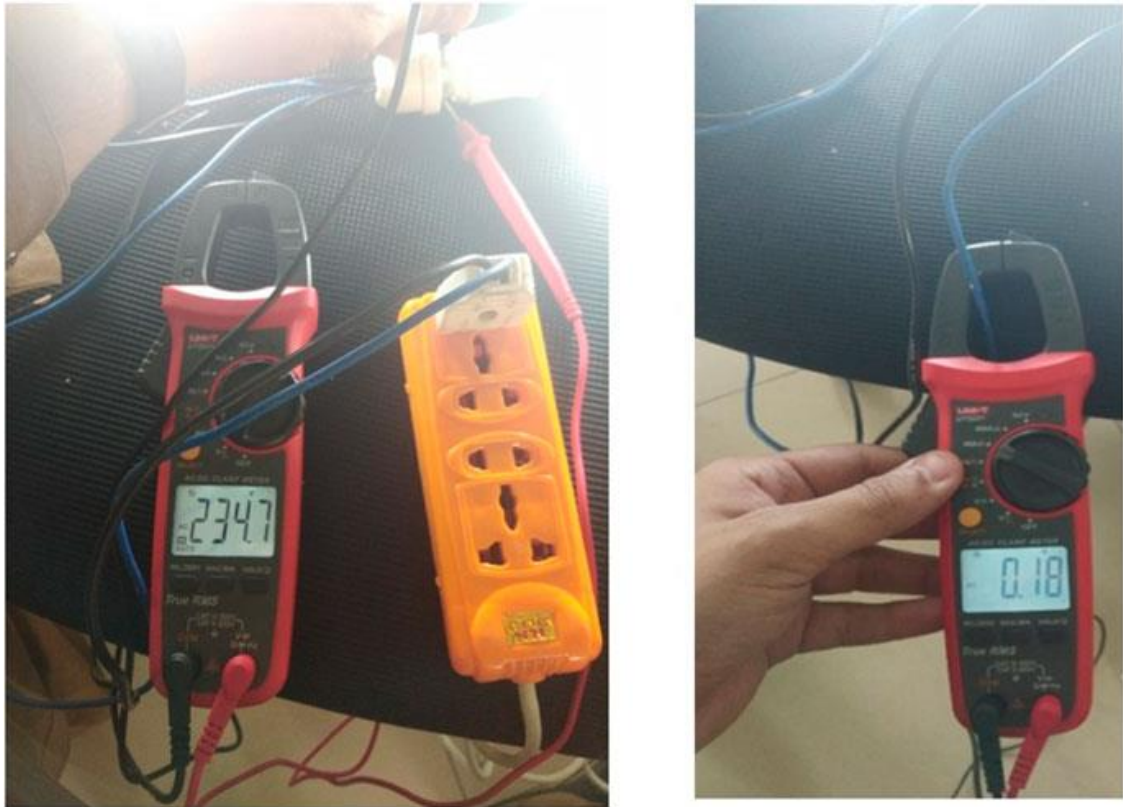


Рисунок 3.4. Напруга інвертора та струм навантаження

3.2.3 Розрахунок ефективності системи живлення постійного струму

Загальна вхідна потужність від фотоелектричних батарей може бути записана як

$$P_{in1} = U_{s1} \cdot I_{s1}$$

$$P_{in1} = 61,9V \cdot 1,32A = 81,708W$$
(3.1)

Загальна вихідна потужність після MPPT контролера буде рівна:

$$P_{out1} = U_B \cdot I$$

$$12,19V \cdot 6,2A = 75,578W$$
(3.2)

Отже ККД DC/DC перетворення буде становити:

$$\eta_1 = \left(\frac{P_{out}}{P_{in1}} \right) = \left(\frac{75,578}{81,708} \right) = 92,5\%$$
(3.3)

3.2.4 Розрахунок ККД традиційної системи змінного струму

Загальна вхідна потужність, від акумулятора до інвертора становить:

$$P_{in2} = U_B \cdot I \quad (3.4)$$

$$P_{in2} = 12,19 \text{ В} \cdot 4,50 \text{ А} = 54,855 \text{ Вт}$$

Загальна вихідна потужність, споживана навантаженням через інвертор, становить:

$$P_{out2} = U_{Inv} \cdot I_{Load} \quad (3.5)$$

$$P_{out2} = 234,7 \text{ В} \cdot 0,18 \text{ А} = 42,246 \text{ Вт}$$

Отже ККД DC/DC + DC/AC перетворення буде становити

$$\eta_2 = \left(\frac{P_{out2}}{P_{in2}} \right) = \left(\frac{42,246}{54,855} \right) = 77\% \quad (3.6)$$

3.3 Результати моделювання

3.3.1 Результати в умовах стаціонарного режиму

На рис. 3.5 показано напругу від фотоелектричного поля близько 245 В і струм 81 А. Загальна потужність, отримана в моделюванні від сонячної сторони, становить 20 кВт. Це свідчить про те, що спроектована система постійного струму здатна забезпечити значну кількість електричної енергії, яка потенційно може задовольнити потреби різних пристроїв. Вироблена потужність може бути достатньою для живлення побутових, комерційних та промислових навантажень.

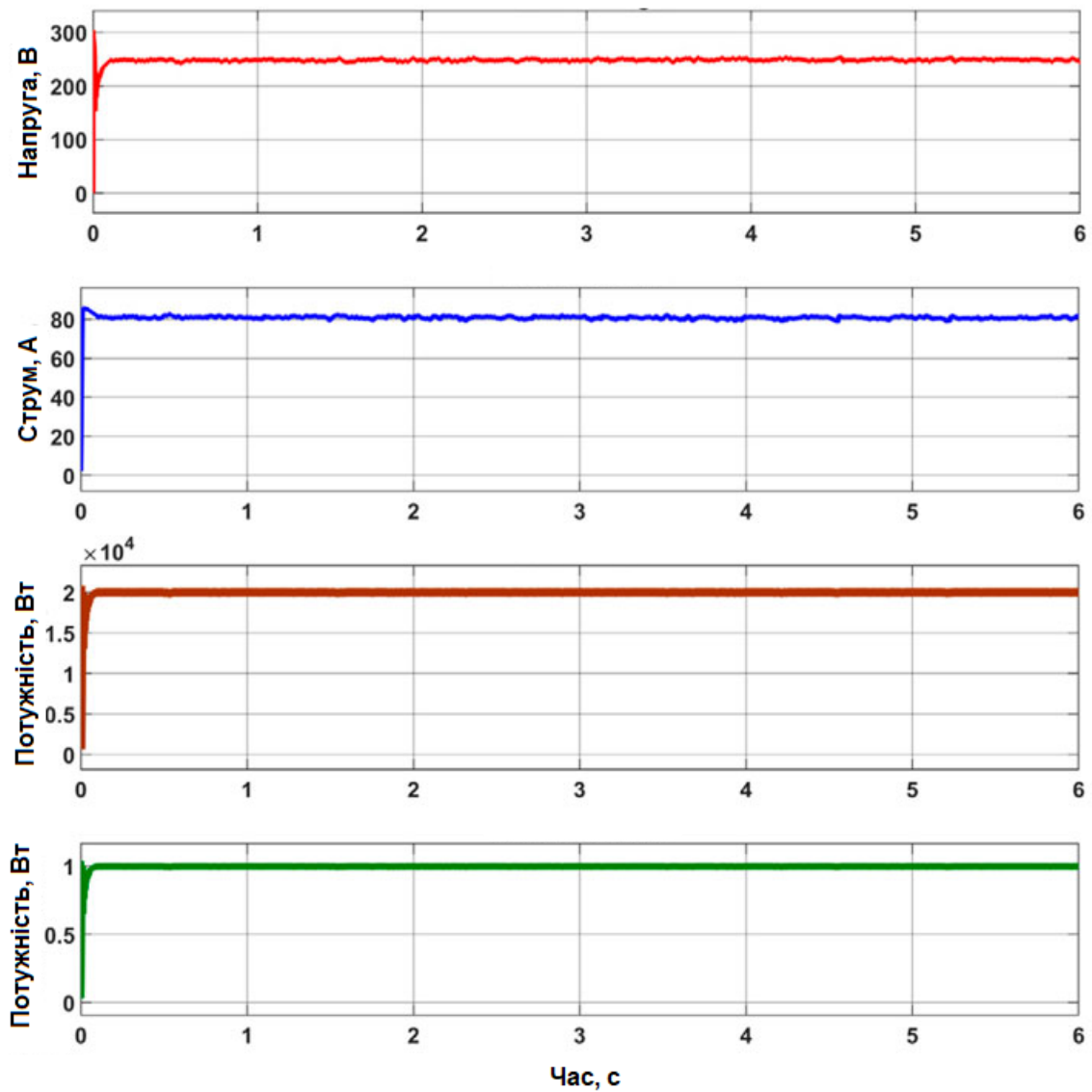


Рисунок 3.5 - Результати моделювання фотоелектричної батареї

На рис. 3.6 зображено графіки генерації вітрогенератора після випрямляча, номінальною постійною потужністю 10 кВт. Спочатку спостерігається піковий перехідний процес, що триває до 0,1 с.

На рис. 3.7 стабільна напруга та струм постійного струму вказують на те, що контролер має здатність регулювати напругу та струм у межах бажаних меж, забезпечуючи стабільну роботу підключеного навантаження. Масштабування номінальної потужності навантаження в одиницях дозволяє полегшити аналіз та оцінку сумісності в мікромережі постійного струму.

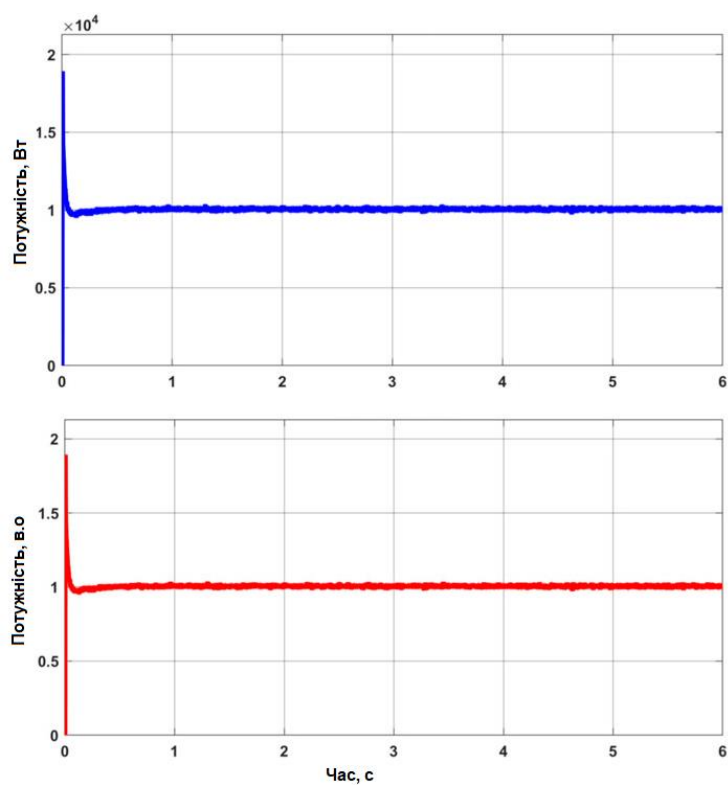


Рисунок 3.6 - Результати моделювання надходження електроенергії від вітрогенератора у мережу постійного струму

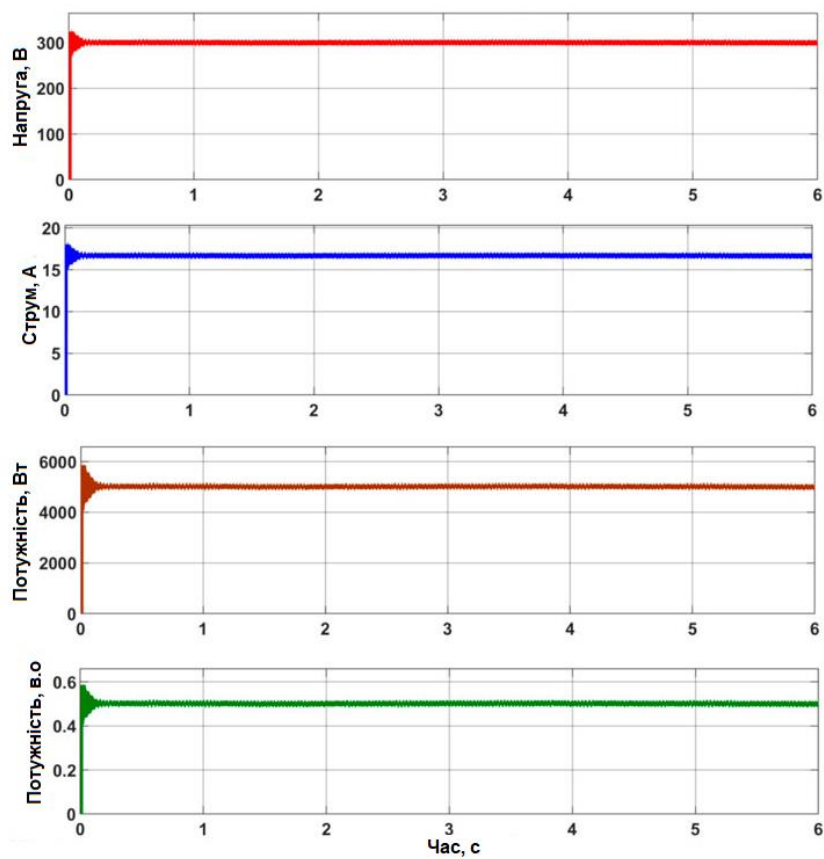


Рисунок 3.7. Результати моделювання підключення резистивного навантаження

постійного струму потужністю 5 кВт

Рис.3.8 показано результати моделювання, які демонструють стабільну напругу постійного струму до 500 В на кожному виводі. У поведінці напруги спостерігається менше перехідних процесів і коротший час стабілізації. Ця стабільність є необхідною для підтримання надійного розподілу енергії та роботи. Крім того, зменшення перехідних процесів і часу стабілізації свідчить про поліпшення характеристик системи та динамічної реакції, що сприяє загальній ефективності та результативності мікромережі.

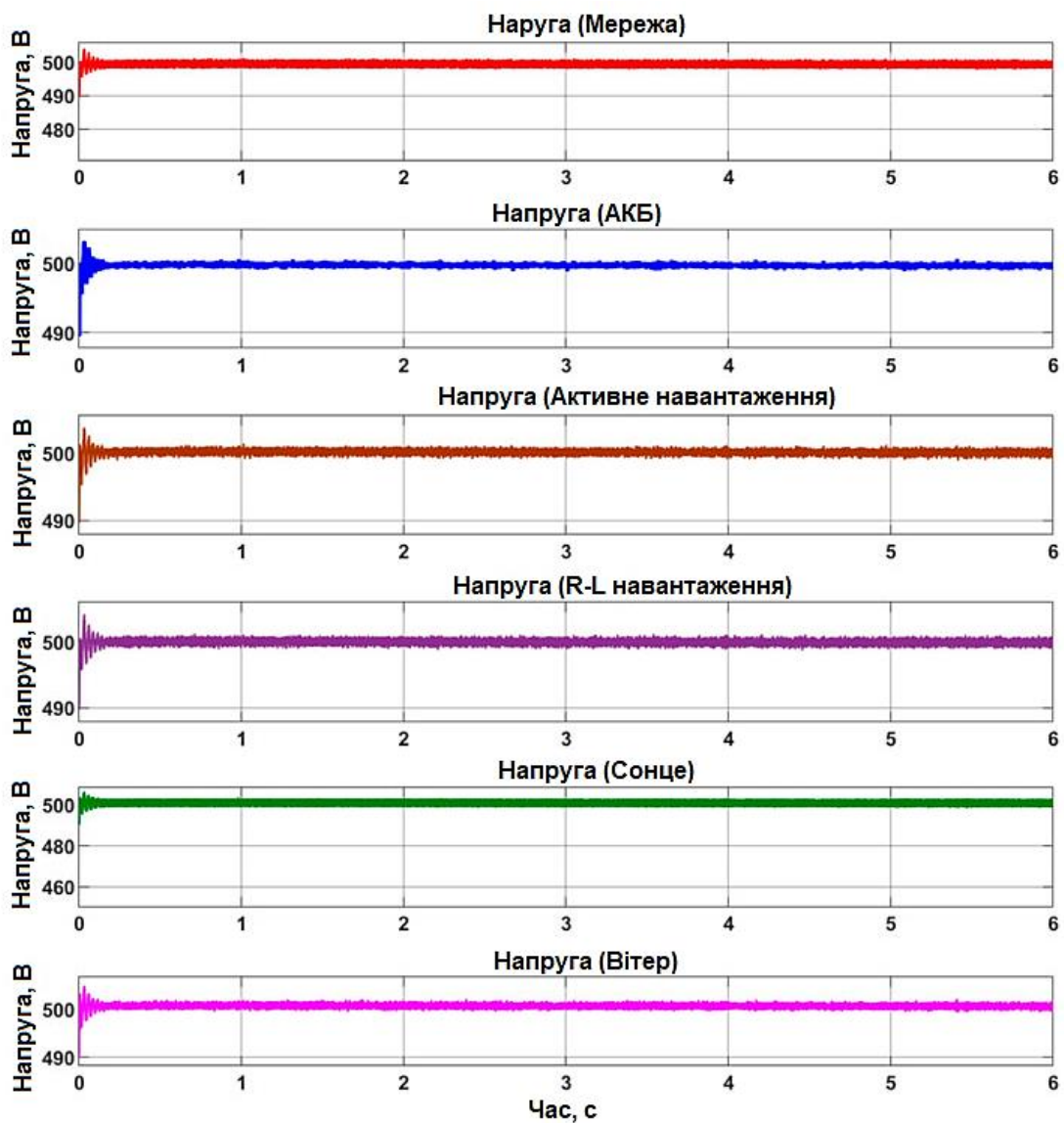


Рисунок 3.8. Результати моделювання напруги шини постійного струму.

3.3.2 Аналіз результатів з вмиканням двигуна як навантаження

Вмикання двигуна на рис. 3.9 спочатку викликає перехідний процес із скачком напруги. Однак з часом він зникає, що призводить до швидкої стабілізації напруги шини. Такі короткотривалі перехідні процеси свідчать про покращення динаміки системи та механізмів управління, що є надзвичайно важливим для оптимізації стабільності та експлуатаційної ефективності мікромережі.

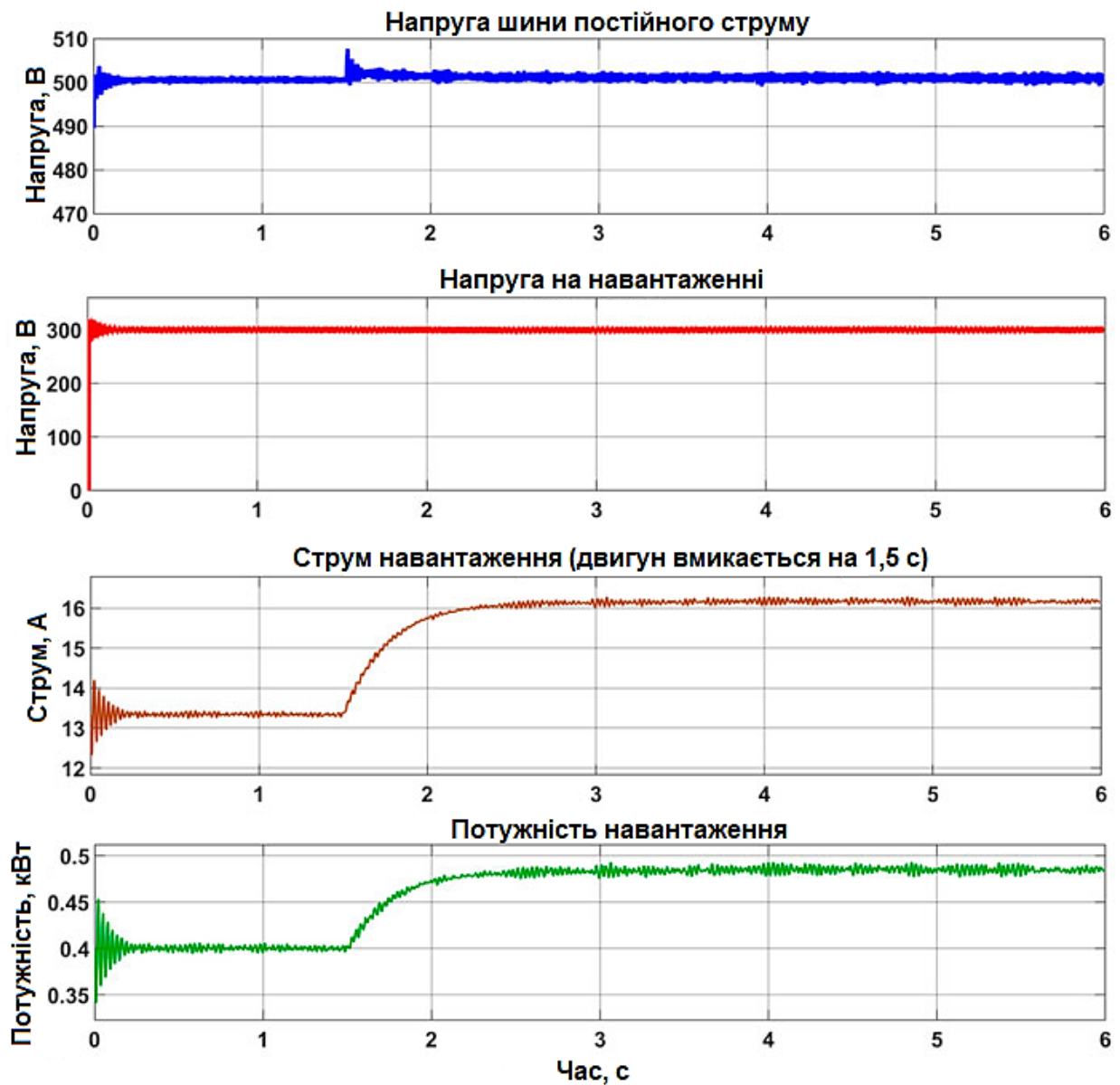


Рисунок 3.9. Результати моделювання під час роботи двигуна як навантаження.

3.3.3 Аварійні ситуації, які можуть виникати в мікромережі

Замикання «лінія-земля»

Як показано на рис.3.10, спочатку шина має напругу 500 В постійного струму, але під час несправності L-G в 0,6–1 с напруга шини стає рівною 0. Стабільність відновлюється через 1,045 с після усунення несправності, швидко відновлюючи напругу шини постійного струму. Швидке відновлення напруги шини підкреслює ефективність механізму управління несправностями, який є важливим для підтримки надійності та стабільності мікромережі постійного струму.

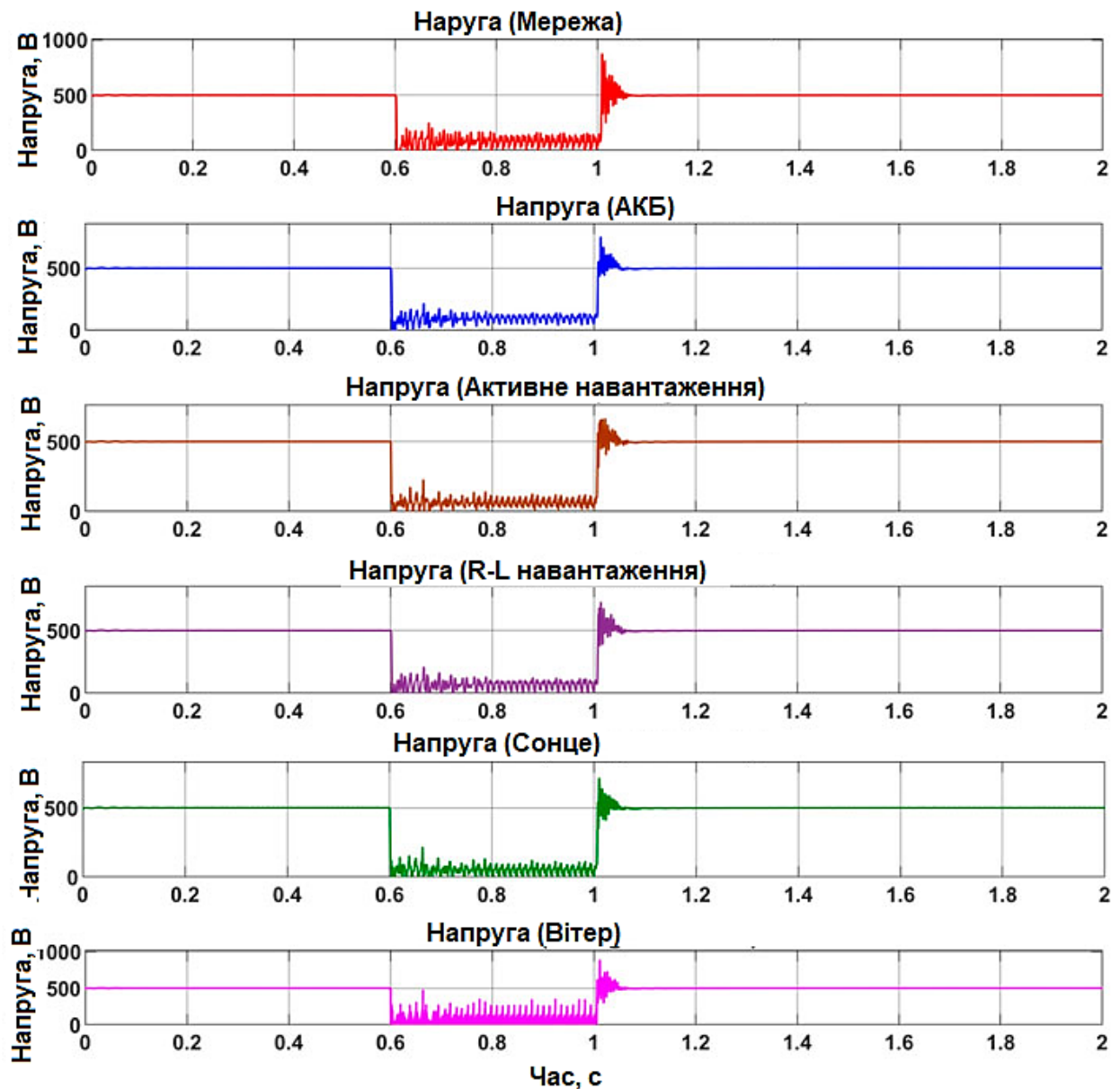


Рисунок 3.10 - Результати моделювання під час замикання «лінія-земля»

несправності (L-G)

Замикання «лінія-лінія»

Як показано на рис. 3.11, спочатку шина має напругу 500 В постійного струму, але під час несправності L-L в проміжку часу від 0,8 с до 1,3 с напруга шини стає рівною 0. Система стабілізується через 1,35 с, коли несправність усувається і напруга шини відновлюється.

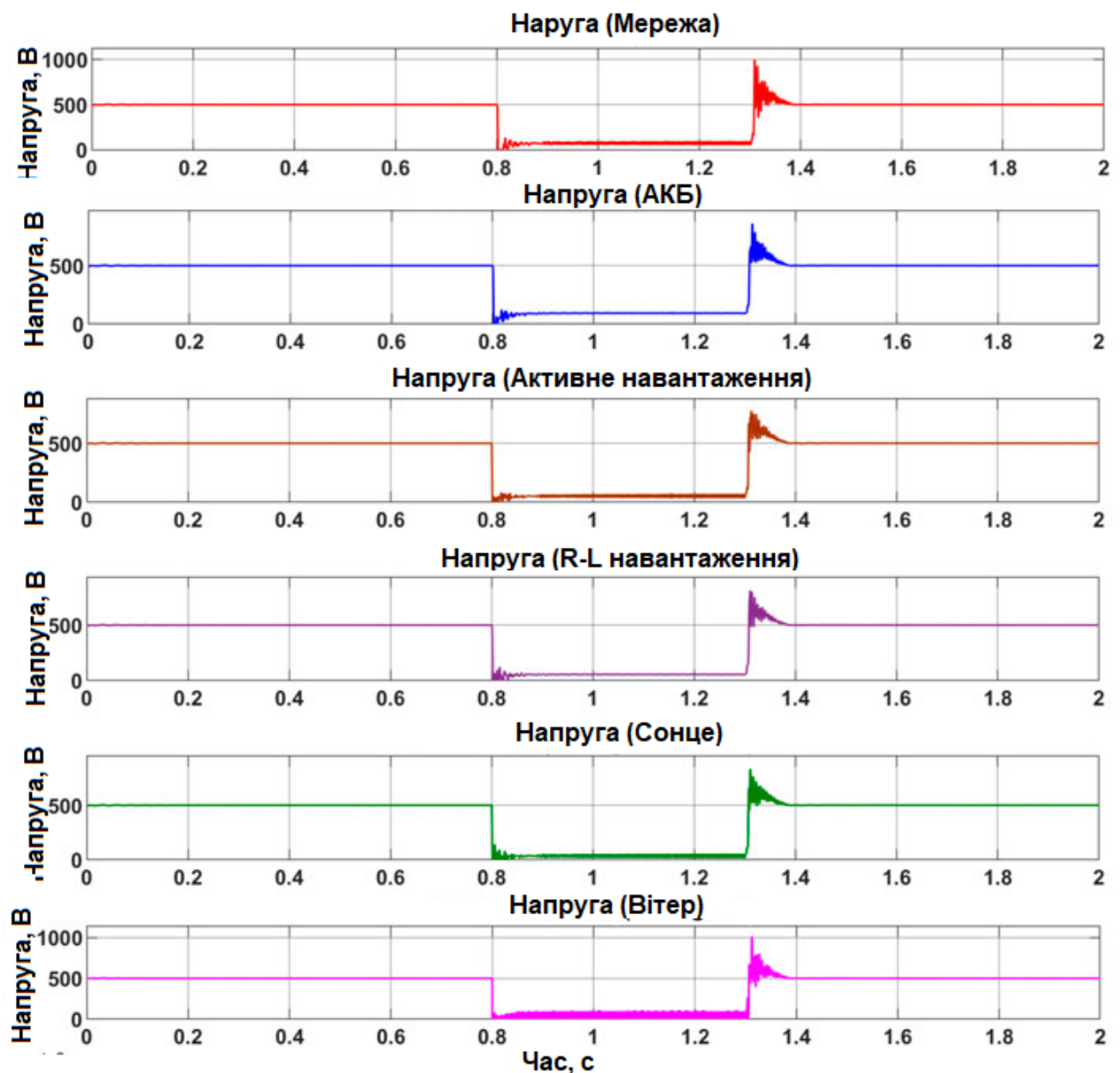


Рисунок 3.11 - Результати моделювання під час несправності (L-L).

3.4 Висновки до розділу

1. Проведені експериментальні вимірювання струмів та напруг у мікромережі постійного струму із фотоелектричною батареєю та споживачами постійного струму. Встановлено, що ККД DC/DC перетворення буде становити 92,5 %.
2. Проведені експериментальні вимірювання струмів та напруг у мікромережі постійного струму із фотоелектричною батареєю та споживачами змінного струму. В цьому випадку використано інвертор для заживлення споживачів змінного струму. Встановлено, що ККД такої системи буде становити 77 %.
3. Проведено моделювання роботи мікромережі при підключенні активного навантаження та реактивного – двигуна. Отримані осцилограми свідчать про високу надійність системи стабілізування постійної напруги.
4. Також проведено моделювання аварійних ситуацій при замиканні лінії землю. Після усуненні несправності система регулювання швидко відновлює напругу живлення до номінального рівня.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Класифікація приміщень за небезпекою електротравм

Відповідно до ПУЕ, приміщення за небезпекою електротравм поділяються на три категорії [37]:

- без підвищеної небезпеки;
- з підвищеною небезпекою;
- особливо небезпечні.

Категорія приміщення визначається наявністю в приміщенні чинників підвищеної або особливої небезпеки електротравм. До чинників підвищеної небезпеки належать:

- температура в приміщенні, що впродовж доби перевищує 35 °С;
- відносна вологість більше 75 %, але менше повного насичення (100 %);
- струмопровідна підлога — металева, бетонна, цегляна, земляна тощо;
- струмопровідний пил;
- можливість одночасного доторкання людини до неструмовідних частин електроустановки і до металоконструкцій, що мають контакт із землею.

До чинників особливої небезпеки електротравм належать:

- відносна вологість близька до насичення (до 100 %);
- агресивне (середовище, що пошкоджує ізоляцію).

Якщо в приміщенні відсутні чинники підвищеної і особливої небезпеки, то воно належить до приміщень без підвищеної небезпеки електротравм.

При наявності одного з чинників підвищеної небезпеки, приміщення належить до приміщень підвищеної небезпеки електротравм.

При наявності одночасно двох чинників підвищеної небезпеки або одного чинника особливої небезпеки, приміщення вважається особливо небезпечним.

Із наведеного видно, що класифікація приміщень за небезпекою

електротравм враховує тільки особливості цих приміщень, стан їх середовища і не враховує електротехнічних параметрів електроустановок.

Категорія приміщень є одним з основних чинників, які визначають вимоги щодо виконання електроустановок, безпечної їх експлуатації, величини напруги, заземлення (занулення) електроустановок. Умови поза приміщеннями прирівнюються до особливо небезпечних.

4.2 Причини електротравм, напруга кроку

Як і при інших видах травм, при електротравмах виділяють технічні, організаційно-технічні, організаційні і організаційно-соціальні їх причини [37].

До технічних причин належать: недосконалість конструкції електроустановки і засобів захисту, допущені недоліки при виготовленні, монтажі і ремонті електроустановки.

До основних організаційних причин електротравм належать:

- відсутність (непризначення наказом) на підприємстві особи, відповідальної за електрогосподарство або невідповідність кваліфікації цієї особи чинним вимогам;
- недостатня укомплектованість електротехнічної служби працівниками відповідної кваліфікації;
- відсутність на підприємстві посадових інструкцій для електротехнічного персоналу та інструкцій із безпечного обслуговування та експлуатації електроустановок;
- недостатня підготовленість персоналу з питань електробезпеки, несвоєчасна перевірка знань, невідповідність групи з електробезпеки персоналу характеру робіт, що виконуються;
- недотримання вимог щодо безпечного виконання робіт в електроустановках за нарядами-допусками, розпорядженнями та в порядку поточної експлуатації;
- неефективний нагляд, відомчий і громадський контроль за

дотриманням вимог безпеки при виконанні робіт в електроустановках та їх експлуатації.

До основних організаційно-соціальних причин електротравм належать: змушене виконання не за спеціальністю електробезпечних робіт; негативне ставлення до виконуваної роботи, обумовлене соціальними чинниками; залучення працівників до понадурочних робіт; порушення виробничої дисципліни; залучення до роботи осіб віком до 18 років.

При переміщенні людини в зоні розтікання струму в землі її ноги будуть торкатися ділянок землі з різними потенціалами, а на людину буде діяти напруга, яка визначається різницею цих потенціалів і відома під назвою *напруга кроку* - різниця потенціалів між двома точками на поверхні землі в зоні розтікання струму, які знаходяться на відстані кроку (0,8 м) одна від одної. З наближенням до місця замикання на землю величина напруги кроку буде зростати, і вона може досягти небезпечних для людини значень вже при напрузі електроустановок 0.4 кВ, а в сиру погоду та за зволоженого ґрунту і при меншій напрузі. Тому Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів при наявності замикання на землю забороняють наближатися до місця замикання ближче 8 м поза приміщенням і 4 м в приміщенні без застосування засобів захисту - діелектричні боти, галоші, суха дошка, сухе гумове взуття тощо.

У цілому, заходи захисту людини від дії напруги кроку зводяться до розірвання мережі струму через людину по петлі "нога-нога", або різкого збільшення опору в цій петлі за рахунок використання різних підручних засобів. За необхідності невідкладного входу в зону небезпечних напруг кроку для надання допомоги потерпілим і т.ін. і відсутності під рукою засобів захисту, доцільно переміщуватися в цій зоні обережно, пересуваючи ступні по землі так, щоб вони постійно торкались одна другої.

4.3 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки

Електротравми відбуваються при потраплянні людини під напругу в результаті доторкання до елементів електроустановки з різними потенціалами, чи потенціал яких відрізняється від потенціалу землі, в результаті утворення електричної дуги між елементами електроустановки безпосередньо, або між осінніми і людиною, яка має контакт з землею, а також в результаті дії напруги кроку.

Електротравматизм як соціальна категорія характеризується сукупністю електротравм за певний проміжок часу, їх абсолютними і відносними показниками, розподілом за тяжкістю, галузями виробництва.

Як попередньо зазначалось, електротравми в загальному виробничому травматизмі складають біля 1%, а в смертельному - біля 15-20%. Останнє свідчить про зміщення виду електротравм у бік тяжких, що є однією з особливостей електротравматизму.

Особливістю електротравматизму є також те, що на електроустановки напругою до 1 кВ припадає до 70-80% електротравм зі смертельними наслідками, а на електроустановки, пащ тою понад 1 кВ, - до 20-30%.

Приведений розподіл електротравм за величиною напруги електроустановок обумовлюється не тільки більшою розповсюдженістю електроустановок напругою до 1 кВ, але, в більшій мірі, ще й тим, що такі установки доступні більшому загалу працівників, які мають недостатньо чіткі уявлення щодо небезпеки електричного струму та вимог безпеки при експлуатації електроустановок.

До установок, напругою понад 1 кВ, має доступ обмежена кількість працівників, які повинні мати достатній рівень підготовки з питань електробезпеки - відповідну вимогам чинних нормативів групу з електробезпеки [8,9].

Крім зазначеного, в порівнянні з іншими видами травматизму, електротравматизму характерні такі особливості:

- людина не в змозі дистанційно, без спеціальних приладів, визначати наявність напруги, а тому дія струму, зазвичай, є раптовою, і захисна реакція організму проявляється тільки після потрапляння під напругу;

- струм, що протікає через тіло людини, діє на тканини і органи не тільки в місцях контакту зі струмопровідними частинами і на шляху протікання, але й рефлекторно, як надзвичайно сильний подразник, впливає на весь організм, що може призводити до порушення функціонування життєво важливих систем організму — нервової, серцево-судинної систем, дихання, тощо;

- електротравм можливі без дотику людини до струмопровідних частин — внаслідок утворення електричної дуги при пробіі повітряного проміжку між струмопровідними частинами, або між струмопровідними частинами і людиною, чи землею;

розслідуванню, обліку і аналізу, в основному, доступні тяжкі електротравми та електротравми зі смертельними наслідками, що негативно впливає на профілактику електротравм.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз мікромереж змінного та постійного струму та гібридних мікромереж. Розглянуто їх переваги та недоліки та ситуації коли можна їх використовувати.
2. Встановлено, що в мікромережах постійного струму потрібно менше перетворювачів енергії, що підвищує їх ефективність, а відновлювані джерела енергії (наприклад, сонячні та електричні транспортні засоби) можуть бути безпосередньо в них інтегровані.
3. Проведено аналіз результатів досліджень авторів публікацій, щодо ефективності мікромереж постійного струму. Встановлено, що з врахуванням втрат при перетвореннях в системах електропостачання та в самих споживачах, ефективність мікромереж постійного струму є вищою щонайменше на 8 % від змінного струму.
4. Проаналізовано базову систему розподілу низької напруги (прототип), що працює на 48 В постійного струму. Встановлено, що ККД системи з постійним навантаженням становить 90,44%. Натомість ККД системи змінного струму з двома ступенями перетворення, складає біля 68,25%.
5. На основі аналізу базового прототипу системи електропостачання мікромережі постійного струму, запропоновано 6-канальну систему електропостачання із стабілізацією вихідної напруги на споживачах.
6. Проведені експериментальні вимірювання струмів та напруг у мікромережі постійного струму із фотоелектричною батареєю та споживачами постійного струму. Встановлено, що ККД DC/DC перетворення буде становити 92,5 %.
7. Проведені експериментальні вимірювання струмів та напруг у мікромережі постійного струму із фотоелектричною батареєю та споживачами змінного струму. В цьому випадку використано інвертор

для заживлення споживачів змінного струму. Встановлено, що ККД такої системи буде становити 77 %.

8. Проведено моделювання роботи мікромережі при підключенні активного навантаження та реактивного – двигуна. Отримані осцилограми свідчать про високу надійність системи стабілізування постійної напруги.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.
2. Філюк Я. О. Автономне живлення зовнішнього освітлення з використанням світлодіодних джерел світла / Ярослав Філюк, Вадим Коваль // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», 19–21 травня 2015 року — Т. : ТНТУ, 2015 — С. 191-192.
3. 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
4. Герега С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей / Степан Герега, Вадим Коваль, Ярослав Філюк // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.
5. Коваль В. П. Енергоефективність системи позиціонування фотоелектричних батарей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, Ю. О. Пилипчук // Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 16-17 листопада 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — Том 3. — С. 139.
6. Герега С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей / Степан Герега, Вадим Коваль, Ярослав Філюк // Матеріали III

- Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування—, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202
7. Іме А.Н. Підвищення ефективності сонячних панелей шляхом використання водяного охолодження/Аях Нсікак Іме, В.П. Коваль//Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій —, 25-26 листопада 2020 року.—Т.: ТНТУ, 2020.—Том 2.— С. 80–81
 8. 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
 9. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing / Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin // ICAAEIT 2021, 15-17 December 2021. — Tern.: TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk“» LLC, 2021. — P. 14–19. — (Electrical engineering and power electronics)
 10. Коваль В.П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів / В.П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Я.М. Осадца, Л.М. Костик // Вісник Хмельницького національного університету – 2022. - №5. – С.168–173
 11. Коваль В. П. Підвищення ефективності використання вітрового потоку у вітрових енергоустановках / В. П. Коваль // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, 14-15 травня 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — С. 204. — (Електротехніка та енергозбереження)

- 12.Рудик А.І. Енергоефективність двороторної вітроенергетичної установки // А.І.Рудик, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей ХІ 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. 70.
- 13.Білевич В.Р. Вплив кількості лопатей на енергоефективність вітротурбіни // В.Р. Білевич; А.М.Яковчук; В.П.Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 11-12.
- 14.Kumar, D., Zare, F., & Ghosh, A. (2017). DC microgrid technology: system architectures, AC grid interfaces, grounding schemes, power quality, communication networks, applications, and standardizations aspects. Ieee Access, 5, 12230-12256.
- 15.Blasi, B. R. (2013). DC microgrids: review and applications.
- 16.Lasseter, R., Akhil, A., Marnay, C., Stephens, J., Dagle, J., Guttromson, R., ... & Eto, J. (2002). The CERTS microgrid concept. White paper for Transmission Reliability Program, Office of Power Technologies, US Department of Energy, 2(3), 30.
- 17.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 .

- 18.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.
- 19.Грицюк М.Я. Переваги концентруючих фотоелектричних електростанцій // М.Я. Грицюк; В.П. Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 29-30.
- 20.Енергоощадна інтелектуальна система керування механічною системою / Богдан Оробчук, Іван Сисак, Ярослав Осадца, Вадим Коваль, Сергій Бабюк // МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 128–130. — (Прикладні застосування механіки в задачах енергозбереження)
- 21.Barnes, M., Kondoh, J., Asano, H., Oyarzabal, J., Ventakaramanan, G., Lassetter, R., ... & Green, T. (2007, April). Real-world microgrids-an overview. In 2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering (pp. 1-8). IEEE.
- 22.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.
23. Коваль В.П. Інтегрування електроавтомобіля у систему електроживлення будинку // В.П. Коваль, к.т.н. доц; А.В. Слободян; К.В. Слободян / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 36-37.
 24. Fathima, A. H., & Palanisamy, K. (2015). Optimization in microgrids with hybrid energy systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 431-446.
 25. Kakigano, H., Nomura, M., & Ise, T. (2010, June). Loss evaluation of DC distribution for residential houses compared with AC system. In *The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA*- (pp. 480-486). IEEE.
 26. Manandhar, U., Ukil, A., & Jonathan, T. K. K. (2015, November). Efficiency comparison of DC and AC microgrid. In *2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA)* (pp. 1-6). IEEE.
 27. Justo, J. J., Mwasilu, F., Lee, J., & Jung, J. W. (2013). AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 24, 387-405.
 28. Sabry, A. H., Shallal, A. H., Hameed, H. S., & Ker, P. J. (2020). Compatibility of household appliances with DC microgrid for PV systems. *Heliyon*, 6(12).
 29. Manandhar, U., Ukil, A., & Jonathan, T. K. K. (2015, November). Efficiency comparison of DC and AC microgrid. In *2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA)* (pp. 1-6). IEEE.

30. Xu, C. D., & Cheng, K. W. E. (2011, June). A survey of distributed power system—AC versus DC distributed power system. In 2011 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (pp. 1-12). IEEE.
31. El-Shahat, A., & Sumaiya, S. (2019). DC-microgrid system design, control, and analysis. *Electronics*, 8(2), 124.
32. 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.
33. Робота фотоелектричної станції на основі гібридного інвертора з різною ємністю системи накопичення електроенергії. Коваль, В., Оробчук, Б., Буняк, О., Гетманюк, В. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки. 343(6(1), (2024). С. 208-214. Галузь науки: технічні (17.03.2020)
34. 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.
35. Гнатюк В.В. Роль систем зберігання електроенергії для енергосистеми // В.В. Гнатюк; В.І. Кузьмич; В.П.Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування

Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 21-22.

- 36.Vijayan, M., Udumula, R. R., Mahto, T., Lokeshgupta, B., Goud, B. S., Kalyan, C. N. S., ... & Twala, B. (2022). Optimal PI-controller-based hybrid energy storage system in DC microgrid. *Sustainability*, 14(22), 14666.
- 37.Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.