

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)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **МОДЕЛЮВАННЯ СТАНЦІЇ ЗАРЯДКИ
ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ, ПІДКЛЮЧЕНОЇ ДО МЕРЕЖІ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТ-42
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

Нагела А.Б.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Нормоконтроль Мовчан Л.Т.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Завідувач кафедри Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Золотий Р.З.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Тернопіль
2026

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)
« _____ » 2026 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 Негелі Андрію Богдановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання станції зарядки електромобілів, підключеної до мережі постійного струму

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

Затверджені наказом ректора від «31» грудня 2025 року № 4/7-1163.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 20.06.2026

3. Вихідні дані до роботи Основним джерелом енергії зарядної станції є фотоелектрична станція, а резервним мережа постійного струму. Зарядна станція заряджає електромобілі постійним струмом високої напруги

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

1. Зарядні станції для електроавтомобілів на постійному струмі

2. Проект зарядної станції для електромобілів

3. Загальний опис компонентів станції зарядки електромобілів

4. Моделювання роботи

5. Аналіз системи, результати розрахунків та моделювання

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

1. Станції зарядки електромобілів

2. Блок-схема зарядної станції для електромобілів

3. Двонаправлений перетворювач постійного струму

4. Лінійна модель акумулятора електромобіля

5. Синхронний понижуючий перетворювач

6. Реалізація СЗЕ в PSCAD

7. Результат моделювання

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>	<i>Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Мовчан Л.Т., к.т.н., доц. кафедри ЕІ</i>		

7. Дата видачі завдання

06.01.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд за напрямком кваліфікаційної роботи	з 19.04.2026 по 25.04.2026	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	з 25.04.2026 по 21.05.2026	
3	Підготовка розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»	з 21.05.2026 по 23.05.2026	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	з 23.05.2026 по 24.05.2026	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	з 24.05.2026 по 28.05.2026	
6	Підготовка, оформлення та друк графічного матеріалу кваліфікаційної роботи	з 28.05.2026 по 01.06.2026	
7	Отримання відгуку та рецензії на кваліфікаційну роботу, підготовка доповіді на захист	з 01.06.2026 по 05.06.2026	

Студент

(підпис)

Нагела А.Б.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(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, 2026. Стор. 69; рис. 34; табл. 5; креслень (презентацій) __; джерел 30.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Моделювання станції зарядки електромобілів, підключеної до мережі постійного струму».

Метою роботи є розробка та моделювання в програмному середовищі PSCAD станції зарядки електромобілів на базі шини постійного струму низької напруги 800 В із інтеграцією фотоелектричної батареї.

У роботі проведено аналітичний огляд інфраструктури заряджання електромобілів. Визначено, що моделі еквівалентних схем (похибка 1-5 %) є оптимальним інструментом для моделювання акумуляторів у складі енергосистем. Проаналізовано системи акумуляування електроенергії. Розроблено архітектуру станції зарядки електромобілів на шині постійного струму низької напруги 800 В. Визначено параметри компонентів. У програмному середовищі PSCAD реалізовано комплексну модель станції зарядки електромобілів. Моделювання підтвердило працездатність двонаправленого перетворювача. Встановлено, що синхронний понижуючий перетворювач забезпечує заряджання постійним струмом 125 А при напрузі ~394 В (потужність 49,3 кВт), що відповідає режиму швидкої зарядки постійного струму рівня 2. Підтверджено здатність алгоритму підтримувати роботу фотоелектричної батареї в точці максимальної потужності. Результати моделювання підтверджують працездатність запропонованої архітектури станції зарядки електромобілів.

Ключові слова: СТАНЦІЯ ЗАРЯДКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ, ПОСТІЙНА НАПРУГА.

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1 Станції зарядки електромобілів.....	8
1.2 Системи акумулювання електроенергії.....	8
1.3 Зарядні станції для електроавтомобілів на постійному струмі.....	10
1.3.1 Класифікація та типи зарядних станцій постійного струму.....	11
1.3.2 Принцип роботи та основні складові компоненти.....	12
1.3.3 Переваги та недоліки зарядних станцій постійного струму.....	13
1.3.4 Сучасні тенденції та перспективи розвитку.....	14
1.4 Моделі акумуляторних батарей.....	14
1.5 Висновки до розділу.....	18
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	19
2.1 Загальний опис станції зарядки електромобілів.....	19
2.2 Проект зарядної станції для електромобілів.....	19
2.3 Двонаправлений перетворювач постійного струму.....	21
2.4 Синхронний понижуючий перетворювач.....	29
2.5 Лінійна модель акумулятора електромобіля.....	31
2.6 Фотоелектрична батарея та підсилюючий перетворювач.....	34
2.7 Висновки до розділу.....	36
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ.....	38
3.1 Загальний опис компонентів станції зарядки електромобілів.....	38
3.2 Робота двонаправленого перетворювача постійного струму.....	39
3.3 Робота синхронного понижуючого перетворювача.....	41
3.4 Моделювання роботи фотоелектричної батареї.....	44
3.5 Аналіз системи, результати розрахунків та моделювання.....	46

3.5.1 Загальний аналіз	46
3.5.2 Робота СЗЕ з мережею ПСВН і без неї	47
3.5.3 Перехідні процеси в синхронному перетворювачі	52
3.6 Висновки до розділу	56
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	58
4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання.....	58
4.2 Фізичні основи електробезпеки	59
4.3 Причини електротравм, напруга кроку.....	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	65

ВСТУП

Актуальність теми. Електротранспорт набуває дедалі більшого поширення в Україні та світі як альтернатива традиційним автомобілям із двигунами внутрішнього згорання. Розгортання інфраструктури заряджання електромобілів є ключовою умовою прискорення цього переходу. Зарядні станції постійного струму (DC) забезпечують швидке заряджання акумуляторів, що критично важливо для міжміських поїздок та комерційної експлуатації електротранспорту. Інтеграція таких станцій з відновлюваними джерелами енергії, зокрема з фотоелектричними батареями, та їхнє підключення до мереж постійного струму відкриває нові можливості для підвищення енергоефективності та зменшення негативного впливу на розподільні електричні мережі. Моделювання таких комплексних систем у програмних середовищах дозволяє на етапі проектування перевірити працездатність усіх компонентів, оптимізувати їхні параметри та зменшити витрати на фізичне прототипування. Отже, тема моделювання станції зарядки електромобілів, підключеної до мережі постійного струму, є актуальною та має важливе практичне значення для розвитку електромобільної інфраструктури.

Мета кваліфікаційної роботи: розробка та моделювання в програмному середовищі PSCAD станції зарядки електромобілів на базі шини постійного струму низької напруги 800 В із інтеграцією фотоелектричної батареї.

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

1. Провести аналітичний огляд інфраструктури заряджання електромобілів, систем акумуляування енергії, технічних характеристик зарядних станцій постійного струму та методів моделювання акумуляторів.

2. Розробити структурну схему станції зарядки електромобілів та визначити параметри її компонентів.

3. Реалізувати модель станції зарядки електромобілів у програмному середовищі PSCAD.

4. Провести аналіз результатів моделювання та оцінку працездатності архітектури станції зарядки.

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань.

Загальний обсяг текстової частини – 69 сторінок.

Кваліфікаційна робота виконана відповідно до вимог [1].

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Станції зарядки електромобілів

Наразі переважна більшість енергії, що споживається транспортним сектором, походить з нафти. Хоча електромобілі складають невеликий відсоток від проданих автомобілів, споживачі охоче купують транспортні засоби з альтернативними паливними системами. Великі (General Motors і Nissan) і малі (Tesla і Motors) автовиробники починають виготовляти і випускати повністю електричні автомобілі. Станції зарядки електромобілів є критично важливою інфраструктурою для розвитку електротранспорту та енергетичного переходу [2]. Їхнє широке розгортання сприяє зменшенню викидів CO₂, зниженню залежності від викопного палива та інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергосистему. За рівнем потужності станції зарядки електромобілів поділяють на три основні типи. Повільні зарядні пристрої використовують стандартні розетки 220 В і забезпечують повну зарядку за 8–12 годин; їх застосовують переважно в домашніх умовах. Швидкі зарядні станції (Level 2, 7–22 кВт) встановлюються у громадських місцях, торгових центрах і на робочих місцях, дозволяючи зарядити автомобіль за 3–6 годин. Ультрешвидкі станції (Level 3, DC, 50–350 кВт) використовують постійний струм і забезпечують зарядку до 80 % ємності акумулятора за 20–40 хвилин, що робить їх придатними для магістралей і автозаправних комплексів.

Сучасні станції зарядки електромобілів інтегрують системи керування зарядним процесом, захисту від перевантажень, комунікації з електромобілем (протоколи CCS, CHAdeMO, GB/T) та оплати. Важливим аспектом є вплив потужних зарядних станцій на розподільні електричні мережі: пікові навантаження можуть призводити до небалансу напруги, перевантаження трансформаторів та збільшення втрат енергії. Для пом'якшення цих ефектів застосовують системи накопичення енергії, інтелектуальне керування навантаженням (smart charging) та Vehicle-to-Grid (V2G) технології, які

дозволяють електромобілям повертати енергію в мережу [3].

Тенденції розвитку станції зарядки електромобілів включають збільшення потужності зарядних пристроїв (понад 350 кВт), впровадження безконтактної індукційної зарядки, використання сонячних панелей та акумуляторних накопичувачів для автономної роботи станцій. В Україні розгортання мережі станцій зарядки електромобілів активізувалося після 2022 року в контексті децентралізації енергопостачання та пошуку альтернатив традиційному автомобільному паливу. Державна підтримка, стандартизація обладнання та інтеграція з ВДЕ є ключовими факторами подальшого розвитку цієї інфраструктури [4].

1.2 Системи акумулювання електроенергії

Системи акумулювання електроенергії (САЕЕ) забезпечують рішення для багатьох цілей розумної енергомережі [5-10]. САЕЕ можуть використовуватися для:

- інтеграції відновлюваних джерел енергії;
- відстрочки капітальних інвестицій на рівні генерації, передачі та розподілу;
- відстрочки капітальних інвестицій у транспорт;
- згладжування пікових навантажень та вирівнювання навантажень;
- зміщення пікових навантажень;
- розподілених систем зберігання енергії;
- управління якістю електроенергії;
- резервування потужності та регулювання зони;
- аварійного резервного живлення [9].

Електроенергія зберігається у великих обсягах (понад 1 кВт) різними способами, включаючи гідроакумуляційні електростанції, технології вторинних акумуляторів (свинцево-кислотні, нікель-кадмієві, натрієво-сірчані) та системи зберігання енергії стисненого повітря (CAES). Технології вторинних

аккумуляторів мають різний ступінь зрілості: від комерційних і промислових установок, що пройшли випробування, до тих, що все ще перебувають на стадії досліджень і розробок; однак ці технології не набули широкого поширення через те, що не відповідають основним вимогам щодо високої ємності та тривалого часу розрядження, залишаючись при цьому економічно ефективними та не вимагаючи особливих умов розміщення. Основним недоліком механічних форм зберігання енергії, таких як гідроаккумуляційні електростанції та CAES, є те, що для їх реалізації потрібні спеціальні геологічні умови, а часто ці місця знаходяться далеко від місць, де необхідне зберігання.

У світі гідроаккумуляційні електростанції та CAES є двома формами зберігання енергії, які використовуються найчастіше. Оскільки гідроаккумуляційні електростанції та CAES можуть використовуватися лише в певних місцях, майбутнє зберігання енергії на рівні енергосистеми належить аккумуляторним технологіям. Різні технології зберігання енергії мають різний ступінь зрілості: від комерційних і випробуваних у промисловості (свинцево-кислотні аккумулятори, гідроаккумуляційні електростанції) до тих, що все ще перебувають на експериментальній стадії розробки (цинк-бромні аккумулятори). Масове зберігання енергії (понад 1 кВт) використовується для різних цілей, включаючи, але не обмежуючись, управління якістю електроенергії, підтримку на рівні енергосистеми та управління масовою електроенергією. Технології зберігання енергії різняться за: розмірами установок від кіловат до гігават та часом розрядження від секунд до годин, щоб задовольнити широкий спектр використання зберігання енергії [11].

1.3 Зарядні станції для електроавтомобілів на постійному струмі

Зарядні станції постійного струму (DC Fast Charging Stations) становлять собою критично важливий елемент інфраструктури електротранспорту сучасності, забезпечуючи можливість швидкого відновлення ємності аккумуляторних батарей електромобілів. На відміну від зарядних пристроїв

змінного струму (АС), які постачають електроенергію на бортовий зарядний пристрій транспортного засобу для подальшого перетворення, станції постійного струму безпосередньо виробляють постійний струм необхідних параметрів, що дозволяє значно прискорити процес заряджання та підвищити загальну енергоефективність системи. Розвиток мереж DC-станцій є ключовим фактором подолання так званої "тривожності дальності" (range anxiety) серед користувачів електромобілів і прискорення масової адаптації електричного транспорту.

Актуальність дослідження зарядних станцій постійного струму зумовлена кількома чинниками. По-перше, стрімке зростання парку електромобілів в Україні та світі потребує розширення відповідної інфраструктури. По-друге, технологічні досягнення у галузі силової електроніки та систем управління дозволяють створювати все більш потужні та ефективні зарядні комплекси. По-третє, питання стандартизації та сумісності зарядних роз'ємів, протоколів комунікації та систем оплати залишається ключовим викликом для забезпечення безперешкодної експлуатації електротранспорту.

1.3.1 Класифікація та типи зарядних станцій постійного струму

Зарядні станції постійного струму класифікуються за кількома ознаками: за рівнем потужності, за способом підключення, за конструктивним виконанням та за рівнем автоматизації. За потужністю розрізняють три основні категорії DC-станцій: малопотужні (до 50 кВт), середньопотужні (50-150 кВт) та високопотужні (понад 150 кВт, у тому числі ультрашвидкі системи потужністю 350 кВт і вище). Кожна категорія орієнтована на певні сценарії використання: малопотужні станції підходять для місць тривалої стоянки (торгові центри, готелі), середньопотужні — для міської інфраструктури та приміських маршрутів, а високопотужні — для магістральних трас, де ключовим фактором є мінімізація часу зупинки.

За способом підключення виділяють станції з кабельними системами підключення різних стандартів: CHAdeMO (розроблений японськими

виробниками), CCS (Combined Charging System, європейський та північноамериканський стандарти) та GB/T (китайський стандарт). Станції нового покоління часто підтримують декілька стандартів одночасно, що забезпечує універсальність обслуговування. За конструктивним виконанням розрізняють настінні (wall-mounted), підлогові (floor-standing) та модульні (container-type) станції. Модульні комплекси особливо популярні для розгортання великих зарядних хабів, оскільки дозволяють масштабувати потужність шляхом додавання стандартних силових модулів.

1.3.2 Принцип роботи та основні складові компоненти

Архітектура зарядної станції постійного струму включає кілька функціональних блоків, кожен з яких виконує певні завдання в процесі перетворення та передачі електричної енергії. Основними компонентами є: вхідний фільтр та система захисту, силовий перетворювач (випрямляч з активним корекцією коефіцієнта потужності), DC-DC перетворювач для узгодження вихідної напруги, система управління та контролер комунікацій, дисплей та інтерфейс користувача, а також кабельно-роз'ємний комплекс.

Силовий перетворювач є серцем зарядної станції. Сучасні DC-станції використовують багаторівневі топології перетворювачів на базі силових транзисторів IGBT або SiC MOSFET, що дозволяє досягти високої ефективності перетворення (до 96-98%) при відносно низькому рівні гармонічних спотворень. Використання карбід-кремнієвих (SiC) компонентів порівняно з традиційними кремнієвими приладами дозволяє підвищити робочу частоту перетворювача, зменшити габарити та масу системи, а також поліпшити теплові характеристики. Деякі виробники впроваджують технології галій-нітридних (GaN) приладів для додаткового підвищення ефективності та компактності.

Система управління забезпечує контроль усього процесу заряджання від ініціалізації з'єднання до його завершення. Контролер зарядної станції реалізує протокол комунікації з бортовою системою електромобіля (наприклад, ISO

15118 для CCS або CAN-шина для CHAdeMO), отримує інформацію про стан акумуляторної батареї, її температуру, допустимі межі струму та напруги заряджання, і на підставі цих даних формує оптимальний профіль зарядного струму. Це забезпечує безпеку процесу та максимально можливу швидкість заряджання при збереженні ресурсу батареї.

1.3.3 Переваги та недоліки зарядних станцій постійного струму

Головною перевагою DC-станцій є значно вища швидкість заряджання порівняно з AC-альтернативами. Якщо домашня зарядка AC рівня 2 (11-22 кВт) може потребувати 4-8 годин для повного заряджання, станція постійного струму потужністю 150 кВт здатна поповнити запас ходу на 200-300 кілометрів за 15-20 хвилин. Це робить електромобіль придатним для довгих міжміських поїздок без суттєвих часових втрат. Додатковою перевагою є відсутність необхідності використання бортового зарядного пристрою автомобіля, який є значним джерелом втрат енергії та додаткової ваги транспортного засобу.

Проте DC-станції мають і суттєві недоліки. По-перше, висока вартість обладнання та інфраструктури: ціна промислової DC-станції потужністю 150+ кВт може сягати десятків тисяч доларів США, не враховуючи витрат на підключення до електромережі та підготовку майданчика. По-друге, значні вимоги до потужності електропостачання — одна така станція може споживати стільки ж електроенергії, скільки десятки побутових будинків, що створює навантаження на місцеві електромережі та може потребувати модернізації трансформаторних підстанцій. По-третє, інтенсивне використання швидкої зарядки негативно впливає на довговічність літій-іонних акумуляторів через підвищене тепловиділення та механічні напруги в електродах.

1.3.4 Сучасні тенденції та перспективи розвитку

Сучасний ринок зарядних станцій постійного струму характеризується кількома ключовими технологічними тенденціями. Першою є перехід до ще вищих рівнів потужності: виробники такі як ABB, Siemens, Delta Electronics та китайські компанії презентують системи потужністю 400-600 кВт, здатні забезпечувати "заправку" на 300+ кілометрів за 5-10 хвилин. Другою важливою тенденцією є впровадження технології "plug-and-charge", яка передбачає автоматичну ідентифікацію транспортного засобу та автоматичний старт заряджання без необхідності використання карток або мобільних додатків. Це реалізується через автоматизований обмін сертифікатами між станцією та автомобілем згідно з протоколом ISO 15118.

Також активно розвивається інтеграція DC-станцій з системами накопичення енергії (BESS, Battery Energy Storage System) на базі reused акумуляторів електромобілів. Такі системи дозволяють "згладжувати" пікові навантаження на електромережу, акумулюючи енергію в періоди низького попиту та віддаючи її під час заряджання автомобілів. Це знижує вартість підключення до мережі та дозволяє використовувати енергію з відновлюваних джерел більш ефективно. Крім того, зарядні станції нового покоління часто оснащуються функцією Vehicle-to-Grid (V2G), яка дозволяє повертати енергію з акумулятора автомобіля назад до мережі, створюючи додаткову цінність для власників електромобілів та сприяючи стабілізації енергосистеми.

1.4 Моделі акумуляторних батарей

Основна мета моделювання батарей — надати уявлення про роботу батарей за допомогою математичного рівняння, еквівалентної схеми або поєднання цих двох методів.

Існує кілька основних методів моделювання роботи акумулятора. Ці моделі включають математичні моделі, електрохімічні моделі та еквівалентні

схеми. Всі три методи мають свої унікальні переваги та недоліки. Математичні моделі використовують виключно рівняння для моделювання роботи акумулятора; однак ці моделі не можуть надати необхідну інформацію про I-V для моделювання на рівні системи.

Другим недоліком математичних моделей є те, що їхня похибка в стаціонарному стані становить близько 5-20%, що є найвищим показником серед трьох розглянутих моделей [12]. Електрохімічні моделі [13] враховують кінетику та термодинаміку електрохімічної реакції батареї. Вони є дуже складними і вимагають декількох днів моделювання для отримання точного результату; однак вони забезпечують найточніше моделювання в стаціонарному стані [12]. Моделі еквівалентних схем забезпечують компроміс між математичними та електрохімічними моделями з точки зору точності, яка становить від 1% до 5% [12]. Моделі еквівалентних схем представлені у формі, яка є зручною для роботи інженерів-електриків та інтеграції з програмами моделювання схем.

Електрохімічні моделі батарей використовують хімічні, термодинамічні та фізичні властивості батареї і дають найточніші результати, але за рахунок часу моделювання [13]. Залежність Пеукерта, показана в (1.1), використовується для визначення стану заряду (SOC) батареї з постійною швидкістю розряду [12].

$$I^n \cdot T_i = K \quad (1.1)$$

де I - струм розряду в амперах;

n - константа батареї, що визначається технологією батареї;

K - фіксована константа.

Використовуючи співвідношення Пеукерта, ємність батареї в ампер-годинах при заданій швидкості розряду I_i можна пов'язати з відомою швидкістю розряду I_n , як показано в (1.2).

$$C_i = C_n \cdot I_n / I_i^{n-1} \quad (1.2)$$

де C_i - ємність акумулятора в ампер-годинах;

C_n - відома ємність акумулятора в ампер-годинах;

I_n - відома швидкість розряду в амперах;

I_i - задана швидкість розряду в амперах;

n - константа акумулятора, що визначається технологією акумулятора.

Для постійної швидкості розряду SOC як функція поточної швидкості розряду та ємності може бути обчислена за допомогою (1.3).

$$\begin{aligned} SOC &= 1 - C_{Di} / C_i \\ C_{Di} &= I_i t \end{aligned} \quad (1.3)$$

де C_i - ємність акумулятора в ампер-годинах;

C_{Di} - ємність в ампер-годинах при швидкості розрядження I_i і часі t ;

I_i - задана швидкість розрядження в амперах;

SOC - поточний стан заряду акумулятора.

Для несталості швидкості розряду, що має місце в реальних системах акумулявання енергії, рівняння SOC змінюється, щоб відношення оцінювалося в невеликих часових інтервалах, як показано в (1.4). SOC_K (1.5) — це чистий стан заряду в k -му часовому інтервалі.

$$\Delta SOC_K = -\frac{I_i \Delta t}{3600 C_n} \left(\frac{I_i}{I_n} \right)^{n-1} \quad (1.4)$$

$$SOC_K = SOC_{K-1} + \Delta SOC_K \quad (1.5)$$

де I_i - заданий струм розрядження;

I_n - відома струм розрядження;

C_n - відома ємність акумулятора;

n - константа акумулятора, що визначається технологією акумулятора;

SOC_K - чистий стан заряду на k -му інтервалі.

Моделі акумуляторів з еквівалентною схемою зазвичай використовуються для моделювання енергосистем. Оскільки вони складаються із звичайних компонентів схеми, таких як джерела напруги, резистори та конденсатори, моделі акумуляторів з еквівалентною схемою простіші в роботі для інженерів-електриків. Існує два основних типи моделей акумуляторів з еквівалентною схемою: статичні та динамічні. Статичні моделі акумуляторів використовують заздалегідь визначені та постійні характеристики акумулятора протягом усього моделювання. У динамічній моделі акумулятора напруга, струм, заряд та температура акумулятора змінюються як функції один одного, що динамічно

впливає на вихідну потужність.

Найбільш базова еквівалентна схема для акумуляторів — це ідеальна схема, показана на рис. 1.1. Ця модель характеризується лише джерелом напруги і не відображає внутрішні характеристики акумулятора.



Рисунок 1.1 - Ідеальна еквівалентна схема батареї

Лінійна модель (рис. 1.2) розширює ідеальну схему додаванням резистора, з'єднаного послідовно з джерелом напруги. Цей резистор, R_{int} , представляє внутрішній опір батареї. Джерело напруги, EMF, є напругою батареї без навантаження. Цю модель можна вдосконалити, зробивши значення R_{int} і EMF залежними від SOC батареї, а не фіксованими значеннями.

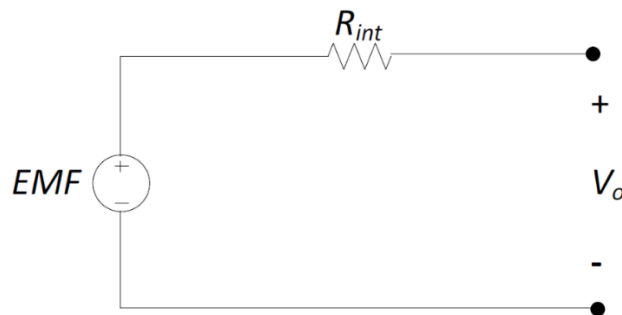


Рисунок 1.2 - Еквівалентна схема батареї Тевеніна

Модель Тевеніна (рис.1.6), включає ідеальну напругу без навантаження, EMF, внутрішній опір батареї, R_2 , а також додавання ємності, C_1 , і опору перенапруги, R_1 . Як і лінійна модель, точність моделі Тевеніна можна поліпшити, зробивши параметри, що визначають внутрішній опір і електрорушійну силу, змінними і визначеними за допомогою струму SOC батареї.

1.5 Висновки до розділу

У результаті проведеного аналітичного огляду сформовано такі висновки:

1. Зарядні станції електромобілів є критичною інфраструктурою енергетичного переходу транспортного сектору. За рівнем потужності вони поділяються на повільні (Level 1), швидкі (Level 2, 7-22 кВт) та ультрашвидкі (Level 3, DC, 50-350 кВт). Потужні зарядні станції створюють пікові навантаження на розподільні мережі, що потребує застосування систем накопичення енергії та smart charging.

2. Перспективним напрямком акумулювання енергії є акумуляторні технології, які не потребують спеціальних геологічних умов на відміну від гідроакумуляційних електростанцій та CAES. Системи акумулювання електроенергії дозволяють інтегрувати відновлювані джерела енергії, згладжувати пікові навантаження та забезпечувати аварійне резервне живлення.

3. Зарядні станції постійного струму забезпечують заряджання до 80 % ємності акумулятора за 20-40 хвилин завдяки безпосередньому формуванню постійного струму силовими перетворювачами на базі IGBT та SiC MOSFET з ефективністю 96-98 %. Ключові тенденції: підвищення потужності до 400-600 кВт, plug-and-charge, інтеграція з BESS та V2G-технології.

4. Моделі еквівалентних схем (похибка 1-5 %) є оптимальним компромісом між точністю та обчислювальною складністю для моделювання акумуляторів у складі енергосистем порівняно з математичними моделями (похибка 5-20 %) та електрохімічними моделями (найвища точність, але надмірна складність).

Таким чином, аналітичний розділ обґрунтовує доцільність та напрями проектування зарядної станції постійного струму у подальших розділах кваліфікаційної роботи.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Загальний опис станції зарядки електромобілів

Традиційні станції зарядки електромобілів (СЗЕ) рівня 2 використовують загальну архітектуру шини змінного струму, яка випрямляє напругу для заряджання електромобілів [7].

Запропонована в роботі станція випрямляє напругу на вході зарядної станції та використовує загальну шину постійного струму в усій СЗЕ [14]. Система, представлена в цій роботі, показана на рисунку 2.1, використовує ідею загальної шини постійного струму [14]. Ця система також враховує можливість підключення до шини постійного струму високої напруги (ПСВН) () через двонаправлений перетворювач постійного струму.

2.2 Проект зарядної станції для електромобілів

Модельована система, рисунок 2.1, складається з сонячної батареї потужністю 20 кВт, двох швидких зарядних пристроїв постійного струму рівня 2 та з'єднання з мережею ПСВН через двонаправлений перетворювач постійного струму, що дозволяє СЗЕ працювати як джерело генерації, коли навантаження відсутнє. У цьому дослідженні вивчається інфраструктура перетворення енергії, присутня в СЗЕ, а також її взаємодія з більшою мережею ПСВН.

Використання шини постійного струму низької напруги (ПСНН) в СЗЕ дозволяє підвищити ефективність системи за рахунок усунення етапу інверсії, який в іншому випадку був би необхідний на виході сонячних панелей. DC СЗЕ також зменшує площу, замінюючи великий вхідний трансформатор 50 Гц на менший високочастотний трансформатор, присутній у двонаправленому перетворювачі постійного струму, при цьому забезпечуючи гальванічну ізоляцію. На рисунку 2.2 представлена типова СЗЕ з сонячними панелями, встановленими на даху. Для шини ПСНН було обрано напругу 800 В постійного

струму. Стандартна напруга шини ПСНН не визначена, і в літературі існує багато рівнів напруги. Шина постійного струму була заземлена за допомогою ємнісного з'єднання на джерелах і навантаженнях, як описано в [15].

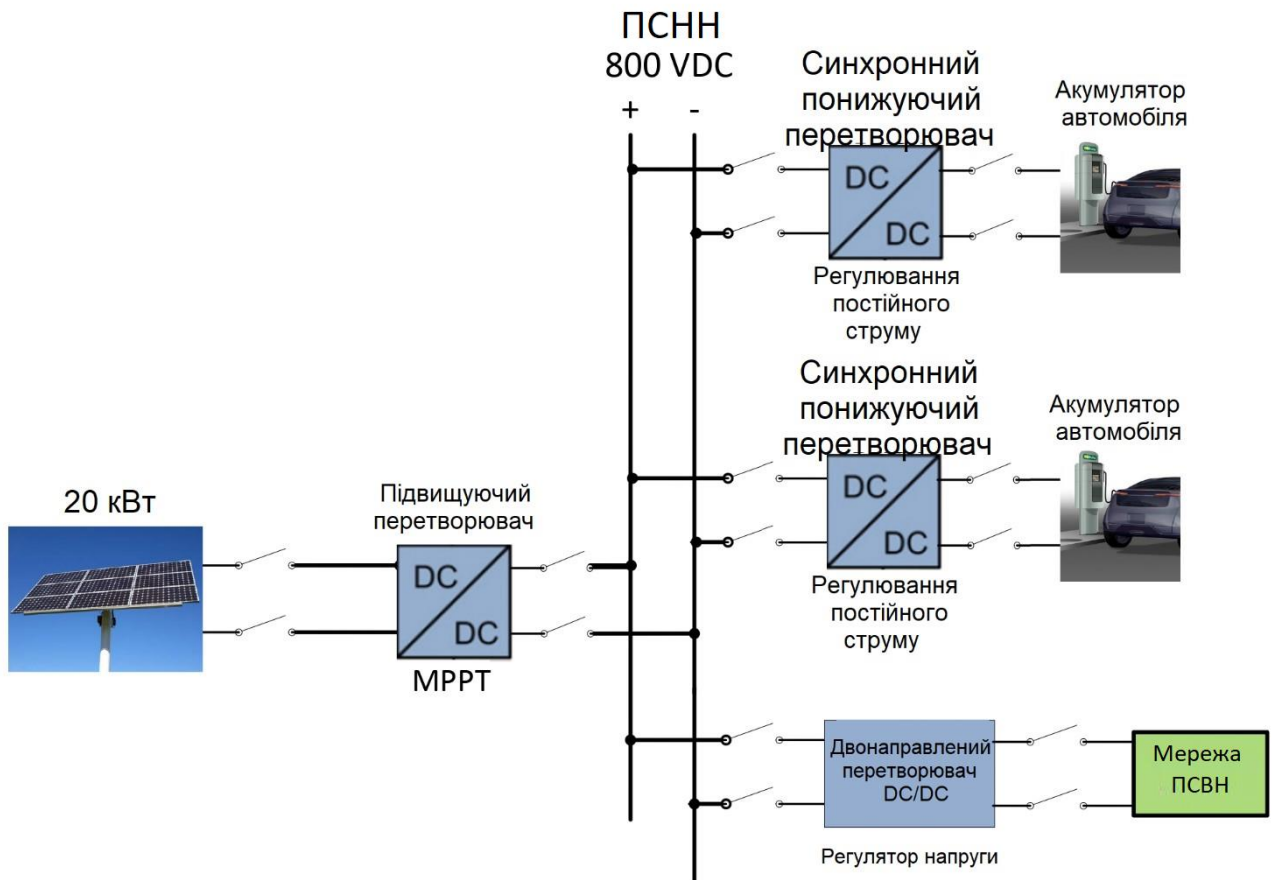


Рисунок 2.1 – Блок-схема зарядної станції для електромобілів



Рисунок 2.2 - Зарядна станція для електромобілів з сонячною генерацією

Розроблена система використовує зарядку автомобілів постійним струмом рівня 2. Зарядка постійним струмом рівня 2 використовує потужність зарядки 50-70 кВт і здатна повністю зарядити електромобіль за 15-50 хвилин. Сучасні системи зарядки класифікуються як змінний струм рівня 1 і рівня 2. Змінний струм рівня 1 заряджає з потужністю 1,4 кВт, і зарядка займає 18 годин. Зарядні пристрої рівня 2 змінного струму забезпечують потужність 3,3 або 6,6 кВт і заряджають відповідно за 8 або 4 години [16]. При потужності заряджання 50 кВт швидкий зарядний пристрій рівня 2 постійного струму може бути встановлений майже виключно в комерційних/промислових місцях.

2.3 Двонаправлений перетворювач постійного струму

Двонаправлений перетворювач постійного струму дозволяє здійснювати двонаправлений потік енергії для використання енергії мережі при необхідності та подачі енергії в мережу при надлишку енергії, як показано на рисунку 2.3. Двонаправлені перетворювачі постійного струму застосовуються в системах акумулювання енергії в акумуляторах, приводах двигунів нового покоління, міжмержевих центрах навантаження, що мають власні джерела генерації. Двонаправлений перетворювач постійного струму, який описаний далі, базується на перетворювачі, розробленому в [17].

Розглянемо роботу двонаправлених перетворювачів постійного струму в контексті СЗЕ, рисунок 2.1. У режимі пониження напруги двонаправлений перетворювач постійного струму, рисунок 2.3, використовує постійне регулювання напруги для роботи в якості стабілізатора напруги для шини ПСНН.

Сигнали керування та форми напруги, а також шляхи проходження струму перетворювача для режимів підвищення та зниження напруги двонаправленого перетворювача постійного струму представлені на рисунках 2.4, 2.5, 2.6 та 2.7 відповідно. Струми I_{HV} та I_{LV} вимірюються з використанням еталону «вхід у перетворювач» в додатньому напрямку, тому I_L є від'ємним у режимі пониження напруги та додатним у режимі підвищення напруги. У режимі

підвищення напруги відображається лише одна форма хвилі струму, рисунок 2.4, оскільки ідеальний вхідний струм є також струмом індуктора. I_{HV} представляє струм, що входить/виходить з високовольтної сторони перетворювача, I_{LV} — струм, що входить/виходить з низьковольтної сторони перетворювача, а I_L — струм через дросельну індуктивність L . Сигнали керування, показані на рисунку 2.4 і рисунку 2.6, базуються на тих, що представлені в [17].

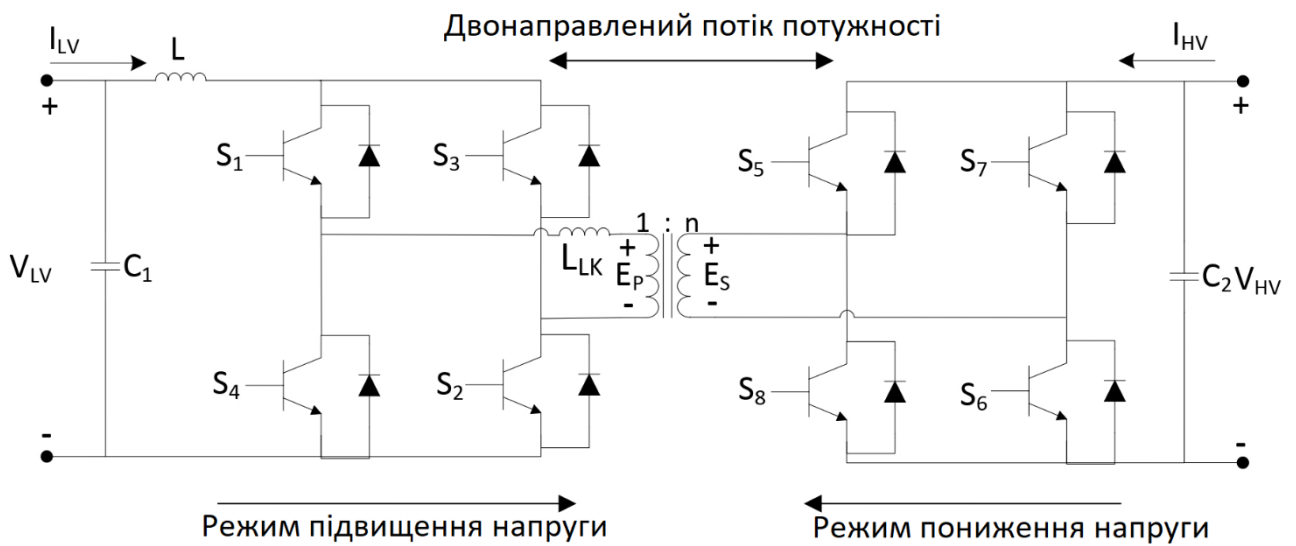


Рисунок 2.3 - Двонаправлений перетворювач постійного струму

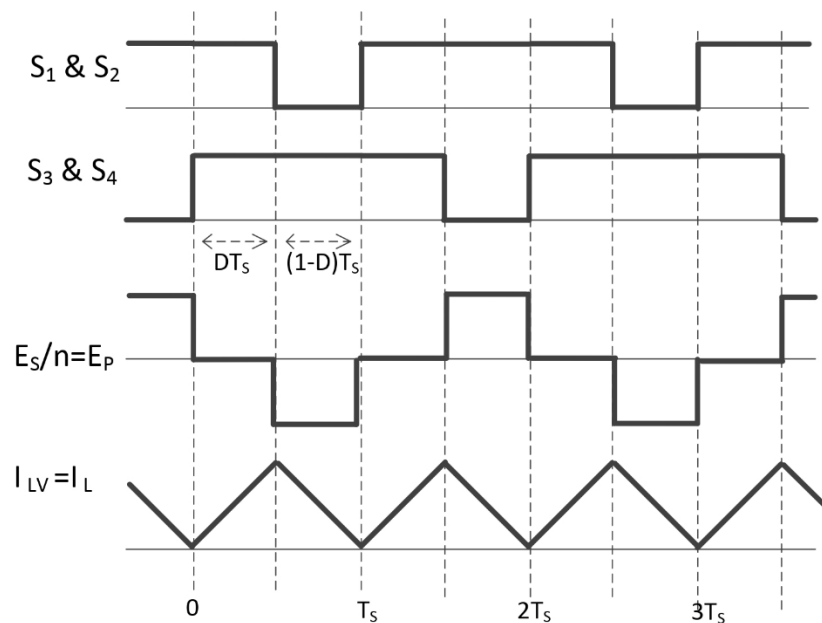
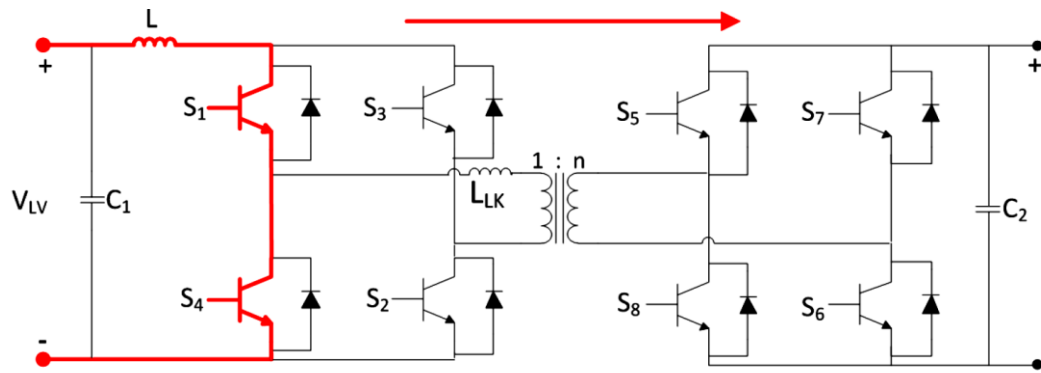
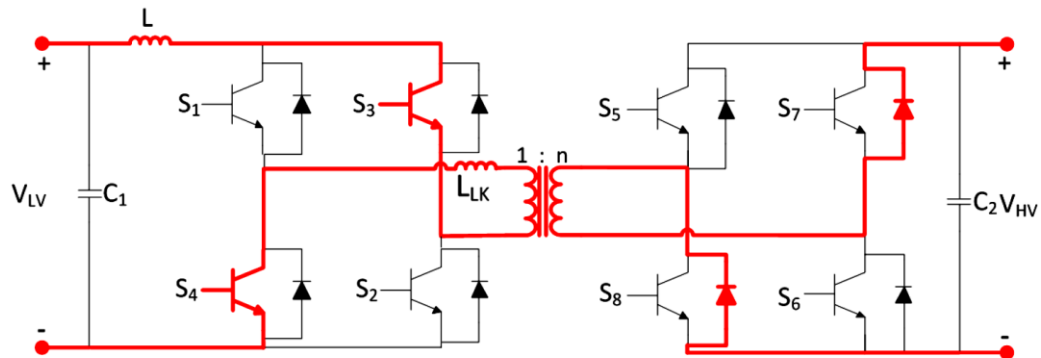


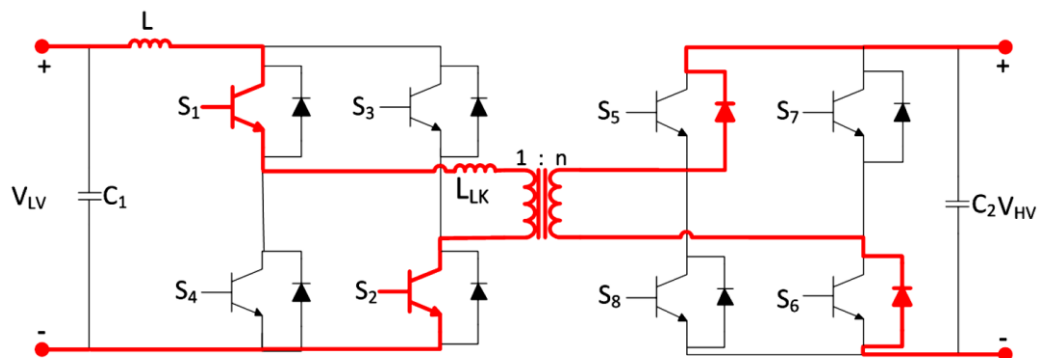
Рисунок 2.4 - Сигнали двонаправленого постійного струму в режимі підвищення напруги



а) інтервал 1: $0 < t < DT_s$ / Інтервал 3: $T_s < t < (T_s + DT_s)$



б) інтервал 2: $DT_s < t < T_s$



в) інтервал 4: $(T_s + DT_s) < t < 2T_s$

Рисунок 2.5 - Шляхи проходження струму перетворювача в режимі підвищення напруги для робочих станів

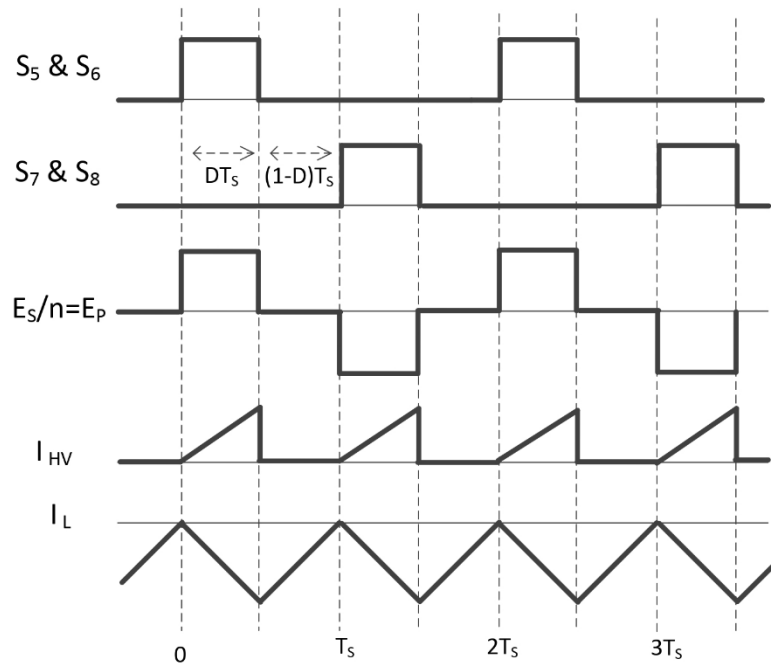
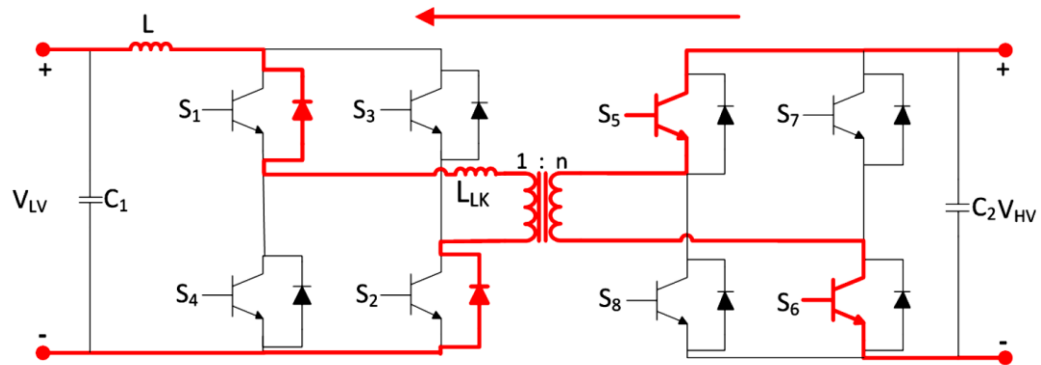


Рисунок 2.6 – Сигнали двонаправленого перетворювача постійного струму в режимі понижуючого перетворювача

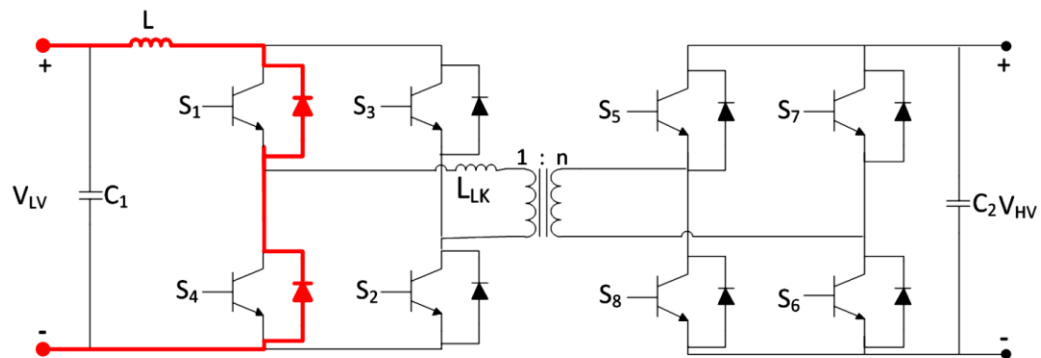
У режимі підвищення напруги двонаправлений перетворювач постійного струму збільшує вхідну напругу з напруги шини ПСНН 800 В до напруги шини ПСВН 4,25 кВ. Як показано на рисунку 2.5, перемикачі 1, 2, 3 і 4 використовуються для генерації синусоїдальної хвилі, яка потім випрямляється за допомогою блоків 5, 6, 7 і 8. У проміжку 1 потік струму показано на рисунку 2.9,а. Під час проміжків 1 і 3 перемикачі 1, 2, 3 і 4 увімкнені, а енергія накопичується в дросельній індуктивності (L). В інтервалі 2, рисунок 2.5,б, перемикачі 1 і 2 вимикаються, і енергія передається з боку низької напруги через трансформатор, випрямляється через блоки 7 і 8 і передається на навантаження. В інтервалі 4, рисунок 2.5, в, енергія, накопичена в дросельній індуктивності, знову передається на навантаження.

У режимі понижуючого перетворювача двонаправлений перетворювач постійного струму знижує вхідну напругу з напруги шини ПСВН 4,25 кВ до напруги шини ПСНН 800 В. Як показано на рисунку 2.6, перемикачі 5, 6, 7 і 8 використовуються для генерації синусоїдальної хвилі, яка потім випрямляється через блоки 1, 2, 3 і 4. У проміжку 1 потік струму показано на рисунку 2.7,а.

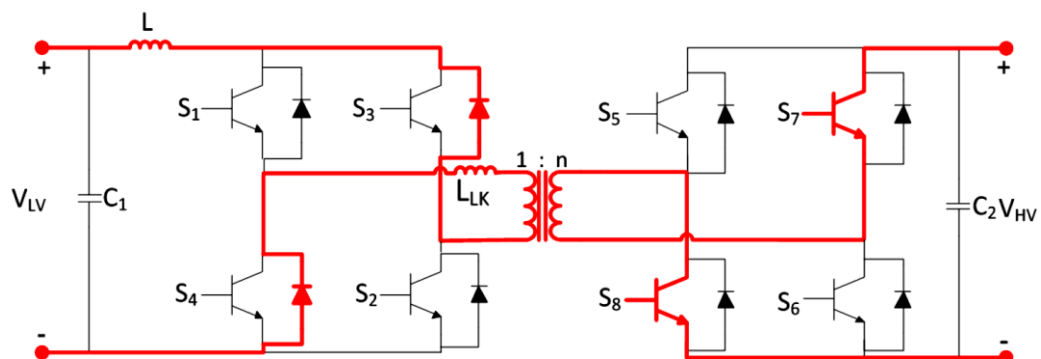
Протягом проміжку 1 енергія передається з боку високої напруги через трансформатор і накопичується в дросельній індуктивності (L). В інтервалах 2 і 4, рисунок 2.7,б, всі перемикачі вимкнені, і енергія циклічно передається через первинну сторону кола на шину низької напруги. В інтервалі 3, рисунок 2.7,в, енергія знову передається з високовольної сторони кола і накопичується в дросельній індуктивності.



а) інтервал 1: $0 < t < DT_s$



б) інтервал 2: $DT_s < t < T_s$ / Інтервал 4: $(T_s + DT_s) < t < 2T_s$



в) інтервал 3: $T_s < t < (T_s + DT_s)$

Рисунок 2.7 - Шляхи проходження струму перетворювача в режимі понижуючого перетворювача для робочих станів

Для прогнозування вихідної потужності перетворювача в стаціонарному режимі при визначенні середньої вихідної напруги та струму використовуються рівняння балансу вольт-секунд для індуктора, рівняння балансу струмів (зарядів) для конденсатора та припущення про малу пульсацію. Аналіз виконується з використанням робочих станів понижуючого перетворювача, представлених на рисунку 2.7. Під час інтервалу 1, рисунок 2.7, а, було виконано другий закон Кірхгофа для обчислення напруги на дросельній індуктивності (v_L), (2.1). Перший закон Кірхгофа було виконано у вузлі над C_1 для обчислення струму через конденсатор (i_c), (2.2)

$$v_L = \frac{V_{HV}}{n} - V_{LV} \quad (2.1)$$

$$i_c = I - \frac{V}{R} \quad (2.2)$$

Під час інтервалу 2, рисунок 2.7, в, перший і другий закони Кірхгофа знову виконувалися в тих самих точках, даючи напругу на дросельній індуктивності, (2.3), і струм через конденсатор, (2.11).

$$v_L = -V_{LV} \quad (2.3)$$

$$i_c = I - \frac{V}{R} \quad (2.4)$$

Виконання першого і другого закону Кірхгофа протягом інтервалу 3, рисунок 2.7, в, та інтервалу 4, рисунок 2.7, в, дає ті самі результати, що й у (2.1) / (2.2) та (2.3) / (2.4) відповідно. Використовуючи рівняння балансу вольт-секунд і рівняння заряду конденсатора, обчислюються середня напруга індуктора, $\langle v_L \rangle$, і середній струм конденсатора, $\langle i_c \rangle$. Рівняння (2.5) показує розрахунок середнього струму індуктора за один період перемикання, який потім використовується для розрахунку вихідної напруги V_{LV} , (2.5), з урахуванням вхідної напруги (V_{HV}), робочого циклу (D) і коефіцієнта перетворення трансформатора (n).

$$\langle v_L \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_L t dt$$

$$\langle v_L \rangle = \frac{\left(\frac{V_{HV}}{n} - V_{LV} \right) DT_s + -V_{LV} D'T_s}{T_s} \quad (2.5)$$

$$V_{LV} = \frac{V_{HV} D}{n} \quad (2.6)$$

Розрахунок середнього струму конденсатора за період перемикання показано в рівнянні (2.7). (2.8) спрощено для розрахунку значення постійного струму індуктора (I) за вихідної напруги (V_{LV}) та опору навантаження (R).

$$\langle i_C \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_C t dt$$

$$\langle i_C \rangle = \frac{\left(I - \frac{V}{R} \right) DT_s + \left(I - \frac{V}{R} \right) D'T_s}{T_s} \quad (2.7)$$

$$I = \frac{V_{LV}}{R} \quad (2.8)$$

У режимі понижування напруги двонаправлений перетворювач постійного струму забезпечує регулювання напруги для шини ПСНН. Регулювання здійснюється за допомогою зворотного зв'язку по напрузі, рисунок 2.8. Контролер вимірює напругу шини ПСНН і порівнює її з еталонним значенням. Блок PI використовується для регулювання стаціонарної похибки перетворювача і часу відгуку. Еталонний несучий сигнал, що працює на $(T_s/2)$, порівнюється з виходом блоку PI і використовується для генерації сигналів управління системою.

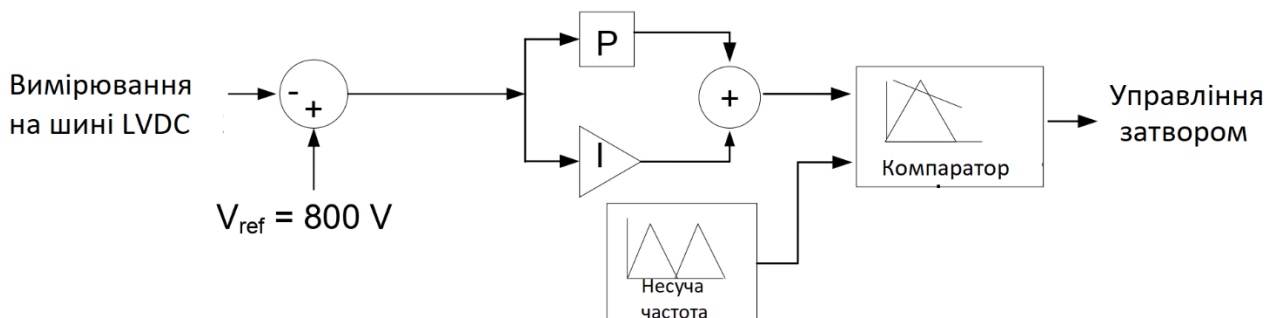


Рисунок 2.8 - Контролер для двонаправленого перетворювача постійного

струму в режимі понижуючого перетворювача

У взаємопов'язаній моделі, через обмежену потужність системи, було підкреслено необхідність використання схеми попереднього заряду. Схема попереднього заряду обмежує пусковий струм вхідного конденсатора (C_2), що є необхідним, оскільки незаряджений конденсатор поводить себе як коротке замикання, що, в свою чергу, призводить до збою шини ПСВН. У цій симуляції використовується найпростіша форма схеми попереднього заряду. Два резистори додаються послідовно з конденсатором, рисунок 2.9, щоб обмежити пусковий струм, і видаляються за допомогою перемикача, коли конденсатор кола постійного струму досягає відповідного рівня заряду. Також зверніть увагу на додавання гальмівної схеми до двонаправленого перетворювача постійного струму, показаного на рисунок 2.9. Гальмівна схема складається з гальмівного резистора (R_{Damp}) і керованого перемикача (S_D), який використовується для активного обмеження напруги шини під час тимчасової втрати навантаження і стаціонарних умов без навантаження, мінімізуючи перевищення і стаціонарну похибку. Таблиця 2.1 містить робочі параметри всіх компонентів двонаправленого перетворювача постійного струму в постійній, ці компоненти базуються на значеннях, наведених у [18].

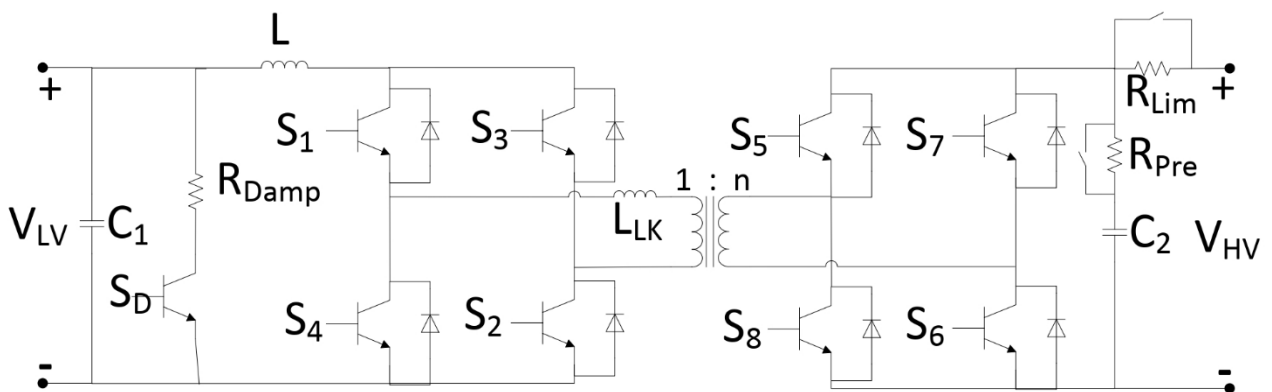


Рисунок 2.9 - Двонаправлений перетворювач постійного струму з колом попереднього заряду та гальмівним колом

Таблиця 2.1 - Робочі параметри двонаправленого перетворювача постійного струму

Індуктивність дроселя (L)	1 мГн
Індуктивність витоку (L_{lk})	27 мкГн
Конденсатор фільтра низької напруги (C_1)	2 мФ
Конденсатор фільтра високої напруги (C_2)	2,7 мФ
Резистор попереднього заряду (R_{pre})	47 Ом
Резистор обмеження пускового струму (R_{Lim})	25 Ом
Резистор демпфірування (R_{Damp})	11 Ом
Коефіцієнт трансформації (n)	3

2.4 Синхронний понижуючий перетворювач

Синхронний понижуючий перетворювач використовується для моделювання зарядного пристрою акумулятора в моделі зарядної станції для електромобілів. Синхронний понижуючий перетворювач, рисунок 2.10, використовується для регулювання потужності зарядки на бажаному рівні (у випадку швидкої зарядки постійним струмом рівня 2, 50 кВт).

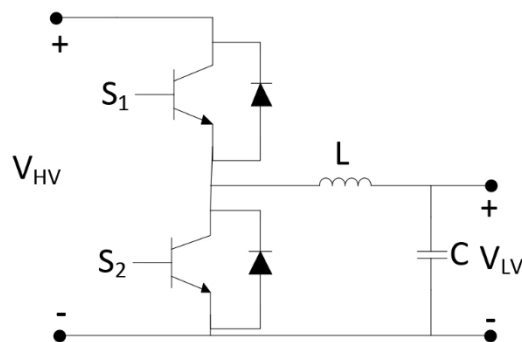


Рисунок 2.10 - Синхронний понижуючий перетворювач

Синхронний понижуючий перетворювач працює аналогічно традиційному понижуючому перетворювачу. Основна відмінність полягає в тому, що замість використання діода для природної комутації під час секції D' періоду перемикач використовується другий перемикач (S_2), графічно зображений на рисунку 2.10. Для регулювання потужності заряджання на рівні 50 кВт

синхронний понижуючий перетворювач використовує постійний зворотний зв'язок за струмом, показаний на рисунку 2.11.

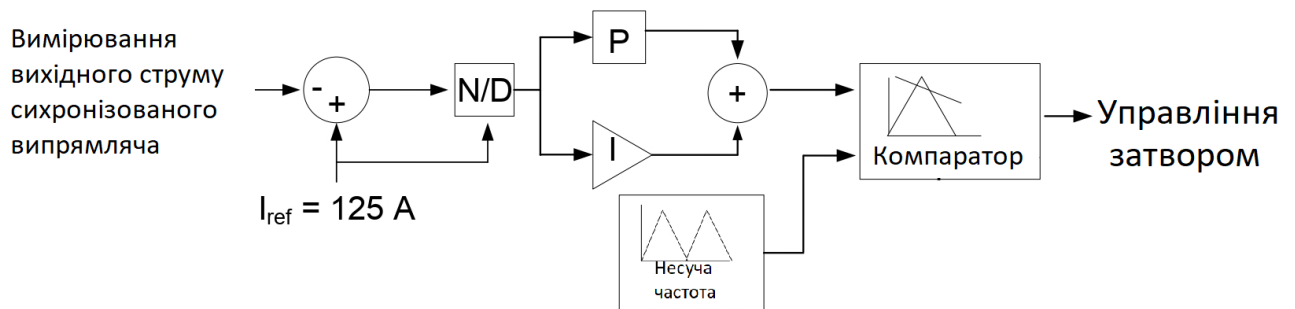


Рисунок 2.11 - Регулятор постійної потужності

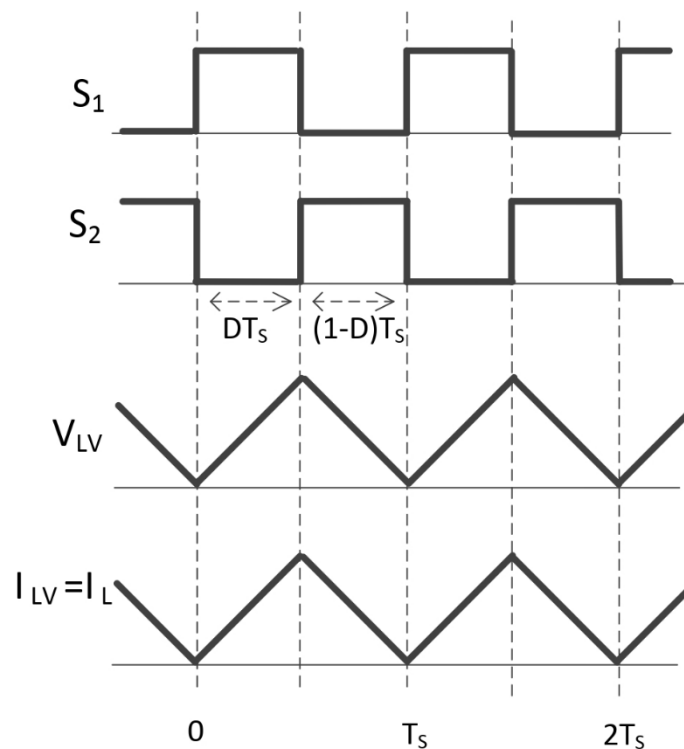


Рисунок 2.12 - Основні робочі сигнали синхронного понижуючого перетворювача

Головною перевагою використання синхронного понижуючого перетворювача над звичайним понижуючим перетворювачем є зменшення втрат на провідність завдяки використанню IGBT під час обох частин періоду перемикавання. Приклад синхронного понижуючого перетворювача, що використовується для заряджання акумуляторів електромобілів, реалізовано в апаратному забезпеченні та представлено в [19]. Значення L (25,3303 мГн) і C (1 мкФ) були обрані таким чином, щоб вони фільтрували гармонічні складові вище

1 кГц, відповідно до (2.9), (2.10) і (2.11).

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\omega_o^2}{j\omega^2 + \omega_o^2} \quad (2.9)$$

$$\omega_o^2 = \frac{1}{LC} \quad (2.10)$$

$$f_{LP} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.11)$$

де ω_o - частота відсічення фільтра в рад/с;

f_{LP} - частота відсічення фільтра в Гц.

2.5 Лінійна модель акумулятора електромобіля

Традиційні методи заряджання електромобілів, такі як зарядні пристрої рівня 1 і 2, потребують від чотирьох до шістнадцяти годин для повного заряджання розрядженого акумулятора, що є можливим лише під час нічного або робочого заряджання. Швидкі зарядні пристрої постійного струму рівня 2 дозволяють заряджати акумулятор електромобіля всього за п'ятнадцять хвилин. Швидкий зарядний пристрій рівня 2 потужністю 50 кВт, що працює при напрузі 400 В постійного струму, матиме зарядний струм 125 А постійного струму.

Приклад графіку заряджання літій-іонної фосфатної (LFP) батареї, яка широко використовується в автомобільній промисловості, наведено на рисунку 2.13 [16]. Типовий цикл заряджання батареї складається з двох режимів: заряджання постійним струмом (CC) та заряджання постійною напругою (CV). Для LFP-батареї, що використовується в автомобільній промисловості, час заряджання CC займає 75 % від загального часу заряджання і досягає SOC приблизно 95 %. Решта 25% часу заряджання акумулятор заряджається за допомогою заряджання CV. З аналізу графіку заряджання, представленого на рисунку 2.13, максимальна потужність заряджання досягається в кінці заряджання CC, тому в моделюванні заряджання акумулятора передбачається SOC 90%.

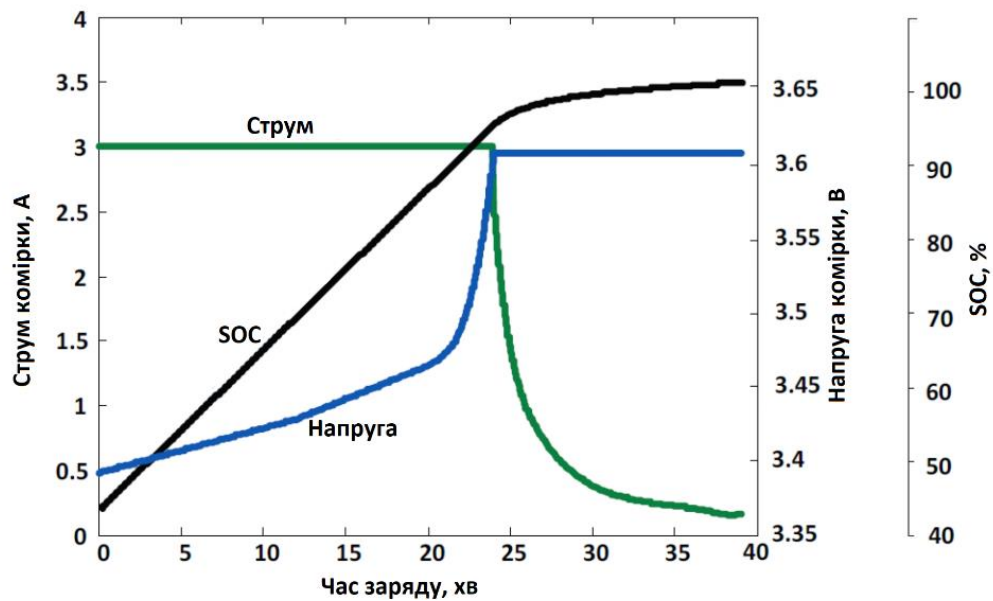


Рисунок 2.13 - Графік заряджання літій-іонного фосфатного акумулятора

Акумулятор електромобіля представлений за допомогою лінійної моделі акумулятора. Моделювання передбачає, що всі автомобілі мають акумулятори однакового розміру (22,1 А·год). Як пояснювалося раніше, для максимізації навантаження системи моделювання передбачає, що акумулятори електромобілів знаходяться в кінці циклу заряджання СС при 95% рівні заряду. Через розмір і складність всієї моделі СЗЕ і ПСВН симуляція виконується лише протягом декількох секунд (2,1 секунди), і протягом цих декількох секунд акумулятор заряджається приблизно 1,0 секунди. Як показано на рисунку 2.13, протягом будь-якого інтервалу в одну секунду заряджання літій-іонного фосфатного акумулятора можна приблизно вважати лінійним. Лінійна модель акумулятора, яка використовується в цьому моделюванні (рисунок 2.14), складається з залежного джерела напруги (EMF), з'єднаного послідовно зі змінним опором (R_{int}).

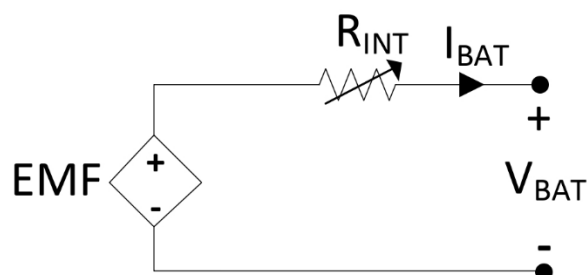


Рисунок 2.14 - Лінійна модель акумулятора електромобіля

Лінійна модель акумулятора розрахована на повністю заряджену напругу на клеммах 600 В постійного струму і заряджається при приблизно 88,3 А постійного струму. Через постійну потужність заряджання акумулятор матиме вищий струм на початку заряджання через нижчу напругу на клеммах. Електрорушійна сила (EMF) і внутрішній опір (R_{int}) лінійно регулюються залежно від стану заряджання акумулятора, як показано в (2.12), (2.13), (2.14) і (2.15). Стан заряду означає відсоток заряду акумулятора, SOC 0,5 означає, що акумулятор заряджений на 50 %. Значення V_{min} (напруга акумулятора при 0 % SOC), R_{int} (внутрішній опір і опір клеми акумулятора), K_V і K_R (константи, що визначаються типом акумулятора) були наближені для отримання бажаного результату.

$$EMF = V_{min} + K_V SOC \quad (2.12)$$

$$R_{int} = R_{min} + K_R SOC \quad (2.13)$$

$$Q_e = - \int_0^t I_{bat} \tau d\tau \quad (2.14)$$

$$SOC = \frac{Q_e}{C_{max}} \quad (2.15)$$

Значення EMF та R_{int} є функціями стану заряду акумулятора (SOC). Заряд акумулятора, Q_e , та SOC обчислюються за формулами (2.15) та (2.16). C_{max} — максимальна ємність акумулятора в ампер-секундах. Параметри лінійної моделі акумулятора наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Робочі параметри лінійної моделі акумулятора

Ємність	22 А·год
V_{min}	366 В
R_{min}	1 МОм
K_V	0,34
K_c	$90 \cdot 10^{-6}$

2.6 Фотоелектрична батарея та підсилюючий перетворювач

У моделі зарядної станції для електромобілів моделюється та симулюється фотоелектрична батарея, встановлена на даху станції. Фотоелектрична батарея служить джерелом локального енергопостачання для СЗЕ [20-27]. Фотоелектрична батарея моделюється на рівні модуля шляхом представлення її як джерела струму в антипаралельному з'єднанні з діодом і опором, за яким підключений резистор, з'єднаний послідовно, рисунок 2.15. Еквівалентна схема фотоелектричного модуля дозволяє отримати кусочно-лінійне наближення вольт-амперної характеристики ($U-I$). Кусочно-лінійне наближення забезпечує точне моделювання в ключових робочих точках характеристики. Порівняння теоретичної вольт-амперної характеристики та характеристики, апроксимованої за допомогою еквівалентної схеми (рисунок 2.15), наведено на рисунку 2.16.[28]

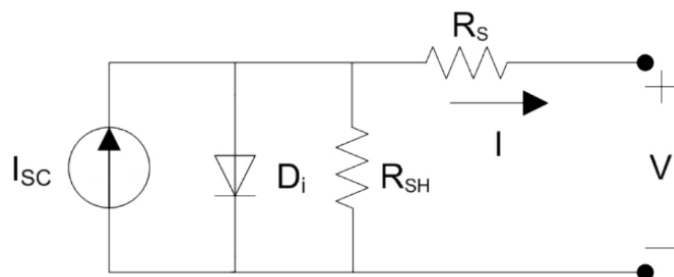


Рисунок 2.15 - Еквівалентна схема фотоелектричної батареї [28]

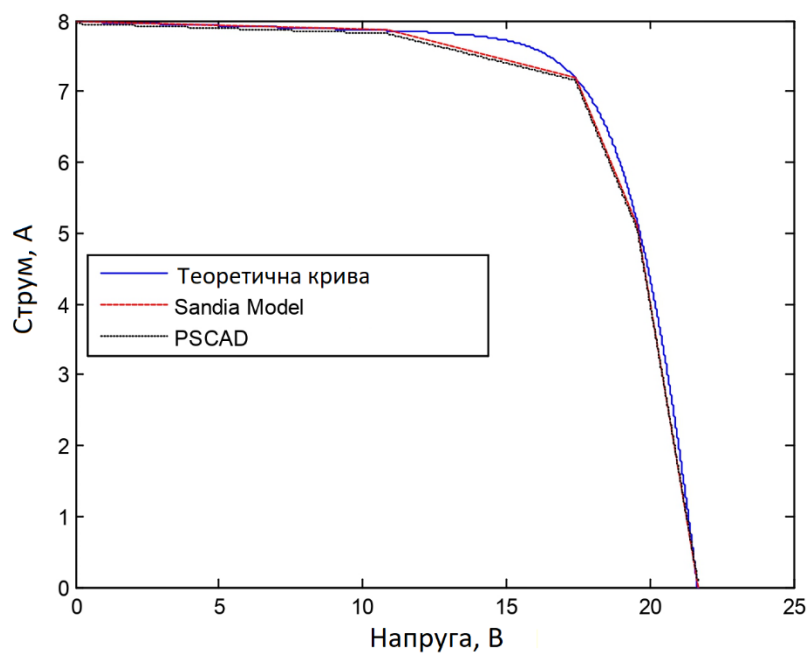


Рисунок 2.16 - Порівняння теоретичної та модельованої кривих V-I для одного фотоелектричного модуля [28]

Фотоелектрична батарея в СЗЕ має потужність 20 кВт. Технічні характеристики сонячних модулів були взяті з виробничих сонячних панелей. Відповідна інформація з технічного паспорта наведена нижче в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Модуль KC125G

Параметр Опис	Значення параметра
Струм короткого замикання	$I_{Sc} = 8,0 \text{ A}$
Струм при $0,5V_{oc}$	$I_x = 7,86 \text{ A}$
Струм для точки максимальної потужності	$I_{mp} = 7,2 \text{ A}$
Струм при $0,5(V_{oc} + V_{mp})$	$I_{xx} = 5,1 \text{ A}$
Напруга розімкнутого кола	$V_{oc} = 21,7 \text{ B}$
Напруга для точки максимальної потужності	$V_{mp} = 17,4 \text{ B}$
Кількість модулів у послідовному з'єднанні для отримання V_{oc}	$N_{sbase} = 36$
Послідовний опір моделі	$R_s = 0,4216 \text{ Ом}$
Шунтовий опір моделі	$R_{sh} = 77,5 \text{ Ом}$

Вихідна потужність фотоелектричної батареї масштабується за допомогою коефіцієнтів масштабування n_s і n_p , які представляють кількість модулів, з'єднаних послідовно та паралельно відповідно. Фотоелектрична батарея була спроектована з вихідною напругою 600 В постійного струму і вихідною потужністю 20 кВт. Вихідний струм фотоелектричної батареї був розрахований на рівні 33,3 А постійного струму з використанням $P=VI$. Кожен послідовне коло модулів виробляє $17,4 \cdot n_s$ В постійного струму, а кожне коло модулів, з'єднаних паралельно, виробляє $7,2 \cdot n_p$ А постійного струму. Розрахунок n_s і n_p показано в рівняннях (2.17) і (2.18).

$$n_s = \frac{600V_{DC}}{17,4V_{DC}} = 34,48 \approx 35 \quad (2.17)$$

$$n_p = \frac{33,3A_{DC}}{7,2A_{DC}} = 4,62 \approx 5 \quad (2.18)$$

Вихідна потужність фотоелектричної батареї приводиться до належного рівня напруги для підключення до шини ПСНН (800 В постійного струму) за допомогою підсилювача напруги. Підсилювач напруги використовує алгоритм відстеження точки максимальної потужності (MPPT) для підтримки максимальної вихідної потужності фотоелектричної батареї на постійному рівні 20 кВт. В якості методу MPPT, що використовується в фотоелектричній батареї, був обраний алгоритм MPPT з інкрементальною провідністю. Згідно з літературою, MPPT з інкрементальною провідністю є адекватним і кращим методом МРТТ [23,24]. Алгоритм інкрементальної провідності працює шляхом визначення точки, в якій похідна кривої потужності фотоелектричної батареї дорівнює нулю, що вказує на точку максимальної потужності. Значення L і C були встановлені відповідно на 10 мГн і 1 мФ, ці значення були обрані для мінімізації пульсацій вихідної потужності.

2.7 Висновки до розділу

1. Розроблена архітектура зарядної станції на базі шини постійного струму низької напруги (ПСНН) 800 В із підключенням сонячної батареї потужністю 20 кВт, двох швидких зарядних пристроїв постійного струму рівня 2 (50-70 кВт) та двонаправленого перетворювача для взаємодії з мережею ПСВН.

2. Спроектовано двонаправлений перетворювач постійного струму, який забезпечує роботу в режимі підвищення напруги (800 В → 4,25 кВ) та режимі пониження напруги (4,25 кВ → 800 В) із схемою попереднього заряду для обмеження пускового струму та гальмівною схемою для захисту від перенапруги.

3. Обрано синхронний понижуючий перетворювач як зарядний пристрій потужністю 50 кВт із постійним зворотним зв'язком за струмом, що дозволяє

зменшити втрати на провідність порівняно зі звичайним понижуючим перетворювачем.

4. Для моделювання акумулятора електромобіля прийнято лінійну модель із параметрами: напруга 600 В, ємність 22 А·год, внутрішній опір і ЕРС як функції SOC. Модель забезпечує наближено лінійну поведінку процесу заряджання LFP-батареї в інтервалах до 1 с.

5. Інтегровано фотоелектричну батарею потужністю 20 кВт на базі модулів KC125G із підсилювальним перетворювачем, який реалізує алгоритм MPPT з інкрементальною провідністю для підтримки максимальної вихідної потужності сонячних панелей.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Загальний опис компонентів станції зарядки електромобілів

Моделювання та робота п'яти основних компонентів СЗЕ здійснюється відповідно до моделей, описаних в розділі 2. Ці п'ять основних компонентів включають двонаправлений перетворювач постійного струму, синхронний понижуючий перетворювач, лінійну модель акумулятора, підвищувальний перетворювач та фотоелектричну батарею. На рисунку 3.1 показано модель СЗЕ на основі PSCAD.

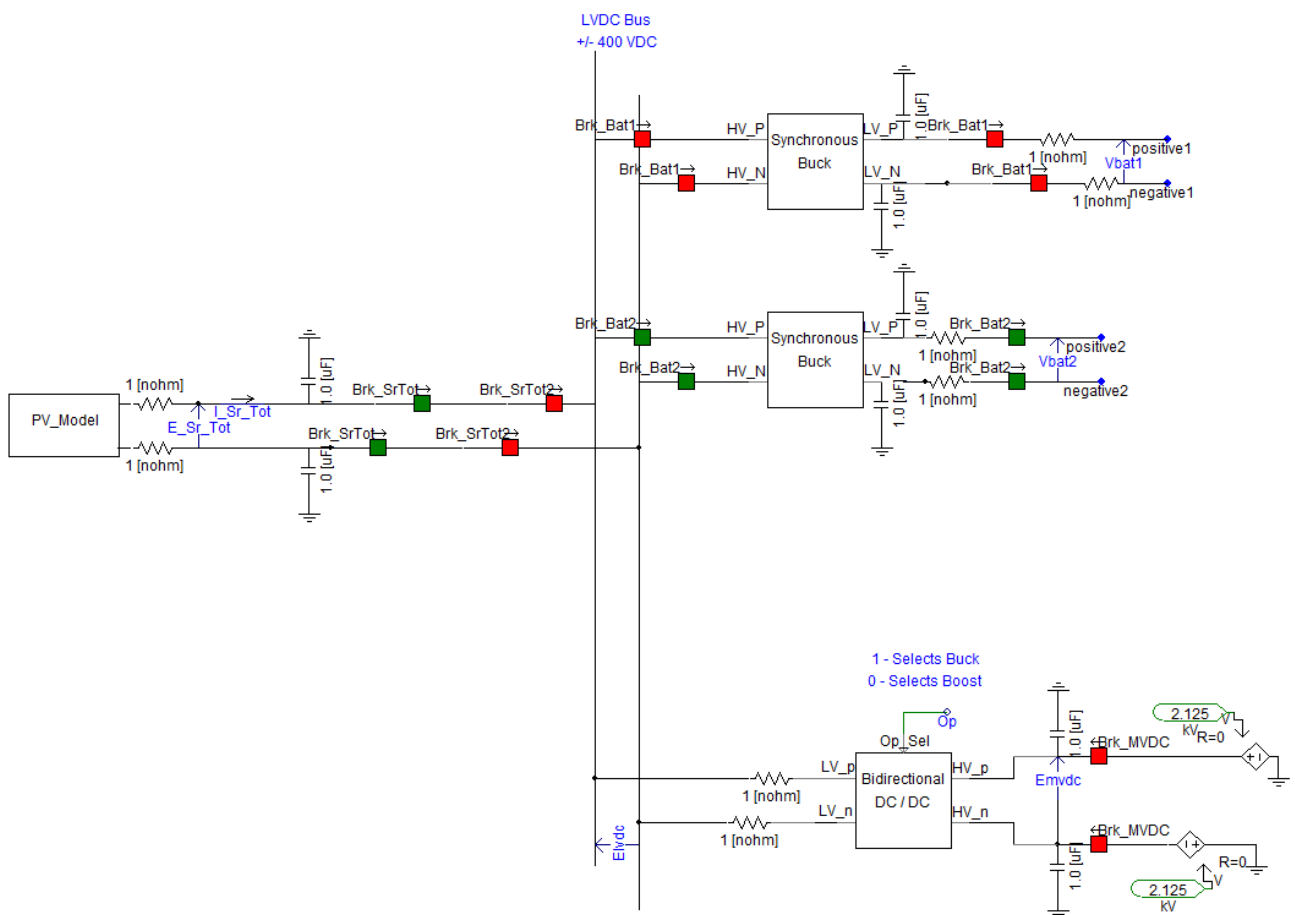


Рисунок 3.1 - Реалізація СЗЕ в PSCAD

Кожен окремий компонент представлений як модуль сторінки. Модель, показана на рисунку 3.1, призначена спеціально для випадку без взаємозв'язку; однак у моделі з взаємозв'язком ідеальні джерела напруги на високій стороні

двонаправленого перетворювача постійного струму замінені з'єднаннями з шиною ПСВН. Резистори $1\text{ n}\Omega$ у всій моделі додані для того, щоб певні вузли не були закорочені.

Система постійного струму заземлена через ємнісне з'єднання на позитивних і негативних шинах у всіх джерелах і навантаженнях.

3.2 Робота двонаправленого перетворювача постійного струму

Двонаправлений перетворювач постійного струму аналітично розглянуто в попередньому розділі, цей розділ служить для перевірки роботи двонаправлених перетворювачів постійного струму в режимі понижувального перетворювача в PSCAD з використанням теоретичного аналізу, виконаного в розділі 2. На рисунках 3.2 і 3.3 показано двонаправлений перетворювач постійного струму, як він був представлений в PSCAD, а також місце, де проводилися вимірювання. Зверніть увагу, що пускові резистори були представлені як змінні опори. Після того, як конденсатор постійного струму C2 досягає бажаного рівня заряду, вони змінюються на $1\text{ n}\Omega$, що по суті є коротким замиканням.

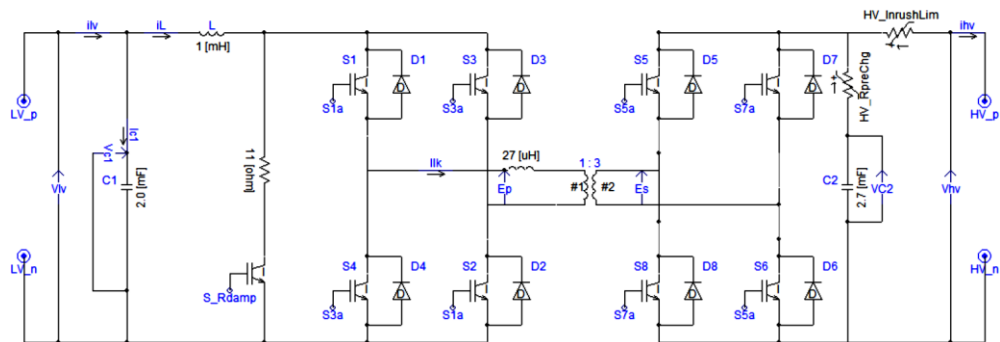


Рисунок 3.2 - Реалізація двонаправленого перетворювача постійного струму в PSCAD

Контролер зворотного зв'язку напруги реалізований в PSCAD, як показано на рисунку 3.3. У режимі понижування напруги низьковольтна сторона перетворювача використовується як пасивний випрямляч, а IGBT вимкнені протягом усього часу. Високовольтна сторона використовує ШІМ для генерації бажаної форми постійного струму. Блок затримки часу використовується для

того, щоб S7 і S8 спрацьовували точно через один період перемикання після S5 і S6.

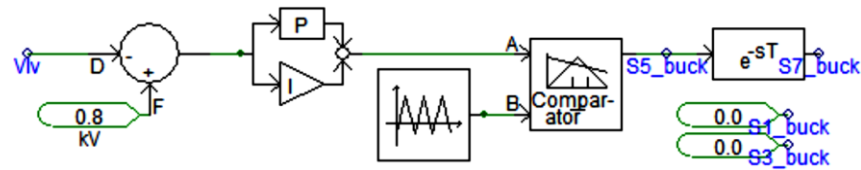


Рисунок 3.3 - Двонаправлений перетворювач постійного струму в режимі понижуючого перетворювача з постійним напругою

Як впливає з розділу 2, рівняння, що визначає середню вихідну напругу (V_{LV}) за заданої вхідної напруги (V_{HV}), робочого циклу (D) і коефіцієнта трансформації (n), має вигляд (3.1). (3.1) можна переписати у вигляді (3.2), щоб можна було обчислити робочий цикл. Використовуючи $V_{LV} = 800$ В, $V_{HV} = 4,25$ кВ і $n = 3$, D обчислюється за формулою (3.2) і дорівнює 0,565.

$$V_{LV} = \frac{V_{HV} D}{n} \quad (3.1)$$

$$D = \frac{n V_{LV}}{V_{HV}} \quad (3.2)$$

Використовуючи сигнали управління з режиму стаціонарної роботи моделі PSCAD перетворювача, робочий цикл вимірюється як 0,552. Це близько до теоретично розрахованого значення 0,565. Різниця пояснюється тим, що в стаціонарному режимі перетворювач має низькочастотні пульсації, спричинені взаємодією різних контролерів і динамікою системи, накладеними на високочастотні (2 кГц) пульсації перемикання.

Під час періоду «УВІМКНЕННЯ» перемикачів високовольної сторони на первинну обмотку трансформатора подається +/- V_{HV} . Коли S5 і S6 «УВІМКНЕНІ», на EP подається + V_{HV} , а під час наступного періоду перемикання, коли S7 і S8 «УВІМКНЕНІ», на EP подається - V_{HV} . У модельованих випадках V_{HV} становить 4,25 кВ. Напруга на вторинній обмотці повинна бути EP/n, у випадку модельованого перетворювача n дорівнює 3, що означає, що ES повинна бути приблизно рівною 1,4 кВ.

Коли в інтервалі «ВКЛ» періоду перемикання або S5 і S6 знаходяться в положенні «ВКЛ», або S7 і S8 знаходяться в положенні «ВКЛ», струм котушки

зменшується приблизно на 180 А від пікового значення приблизно 190 А до мінімального значення приблизно 13 А. Потім під час інтервалу «OFF» струм збільшується приблизно на ту саму величину, так що середній струм протягом будь-якого періоду дорівнює нулю, що відповідає теорії балансу вольт-секунд індуктора. Незважаючи на те, що система працює в стабільному режимі, на високочастотну (2 кГц) пульсацію перемикавання накладається низькочастотна пульсація, через що між періодами перемикавання перетворювач не досягає однакових пікових значень струму.

Струм індуктивності витоків не дорівнює нулю тільки під час інтервалу «ON» періоду перемикавання і під час цього часу є струмом, що протікає через дросельну індуктивність. Під час інтервалів «ON» S_5 і S_6 струм індуктивності розсіювання дорівнює струму дросельної індуктивності. І навпаки, під час інтервалів «ON» S_7 і S_8 струм індуктивності розсіювання є від'ємним значенням струму дросельної індуктивності. Це спричинено різницею полярності на трансформаторі, яка графічно представлена за допомогою робочих шляхів.

Струм входу існує тільки під час інтервалу «ON» періоду комутації, як показано на рисунку 2.7. Струм у низьковольтній частині схеми приблизно дорівнює ni_{HV} .

3.3 Робота синхронного понижуючого перетворювача

Теоретична робота синхронного понижуючого перетворювача представлена в розділі 2. Модель PSCAD для синхронного понижуючого перетворювача представлена на рисунку 3.4.

Один резистор $n\Omega$ необхідний для того, щоб два електричні з'єднання HV_N і LV_N не були підключені до одного і того ж вузла. Коли два електричні з'єднання підключені до одного і того ж вузла, в PSCAD виникає помилка.

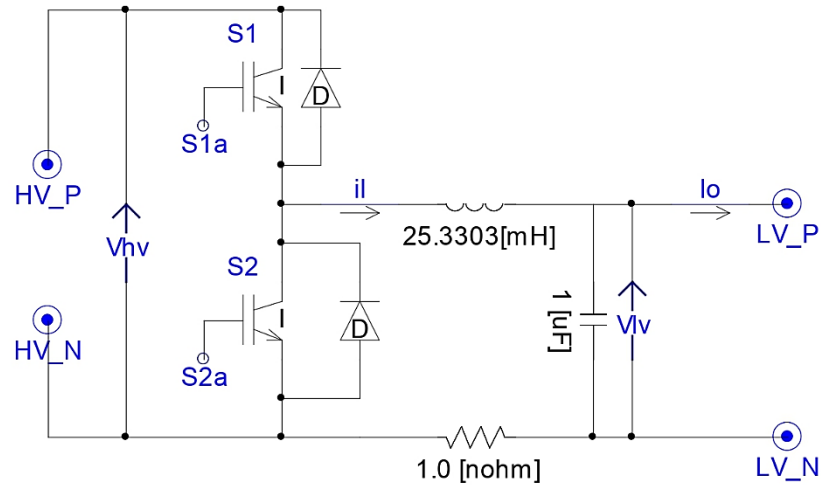


Рисунок 3.4 - Реалізація синхронного понижуючого перетворювача в PSCAD

Синхронний понижуючий перетворювач використовує регулювання постійного струму для виведення необхідного струму зарядки для акумуляторів електромобілів. Регулятор зворотного зв'язку також використовується для генерації сигналів управління для перетворювача.

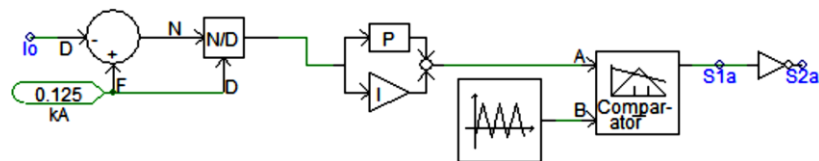


Рисунок 3.5 - Регулятор синхронного понижуючого перетворювача та драйвер сигналів управління

Вихідна напруга та струм синхронного понижуючого перетворювача мають трикутну пульсацію, яка є синфазною та має додатній нахил, коли S_1 увімкнено, та від'ємний нахил, коли S_2 увімкнено. Це проілюстровано на рисунку 2.12.

Лінійна модель акумулятора використовується для моделювання акумулятора електромобіля. Вона представлена як джерело змінної напруги, з'єднане послідовно зі змінним опором, обидва з яких змінюються лінійно залежно від поточного стану заряду акумулятора. Лінійна модель акумулятора представлена в PSCAD, як показано на рисунку 3.6.

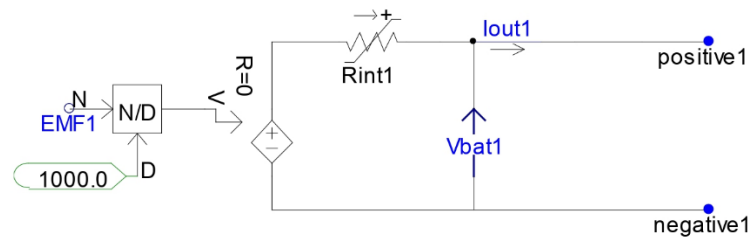


Рисунок 3.6 - Реалізація лінійної моделі акумулятора в PSCAD

Стан заряду акумулятора (SOC) обчислюється відповідно до рівнянь, наведених у розділі 2.2.4. На рисунку 3.7 показано реалізацію рівнянь, наведених у розділі 2, в PSCAD.

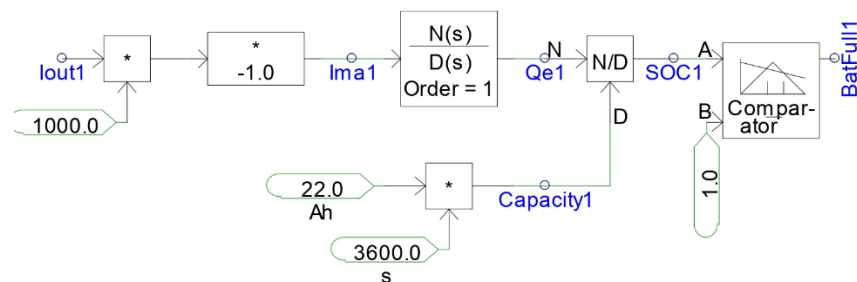


Рисунок 3.7 - Обчислення SOC в PSCAD

На рисунку 3.8 показано напругу та струм для імпульсного заряду акумулятора 2 електромобіля. Імпульсний заряд триває 0,55 секунди. Протягом цього часу акумулятор заряджається постійним струмом 125 А та напругою приблизно 394,25 В (49,3 кВт), яка лінійно збільшується відповідно до рівнянь, наведених у розділі 2.

Цей імпульсний заряд фіксується наприкінці заряджання постійним струмом при 95% SOC. Модельований імпульсний заряд, показаний на рисунку 3.8, відповідає загальній формі еталонного імпульсного заряду.

Ці два імпульсні заряди не є репрезентативними для одного й того самого акумулятора, оскільки еталонний імпульсний заряд заряджається з іншим струмом, станом заряду та напругою, ніж моделювання, і не буде повністю збігатися. Представлено лише напругу та струм заряджання акумулятора, що не підключений до мережі.

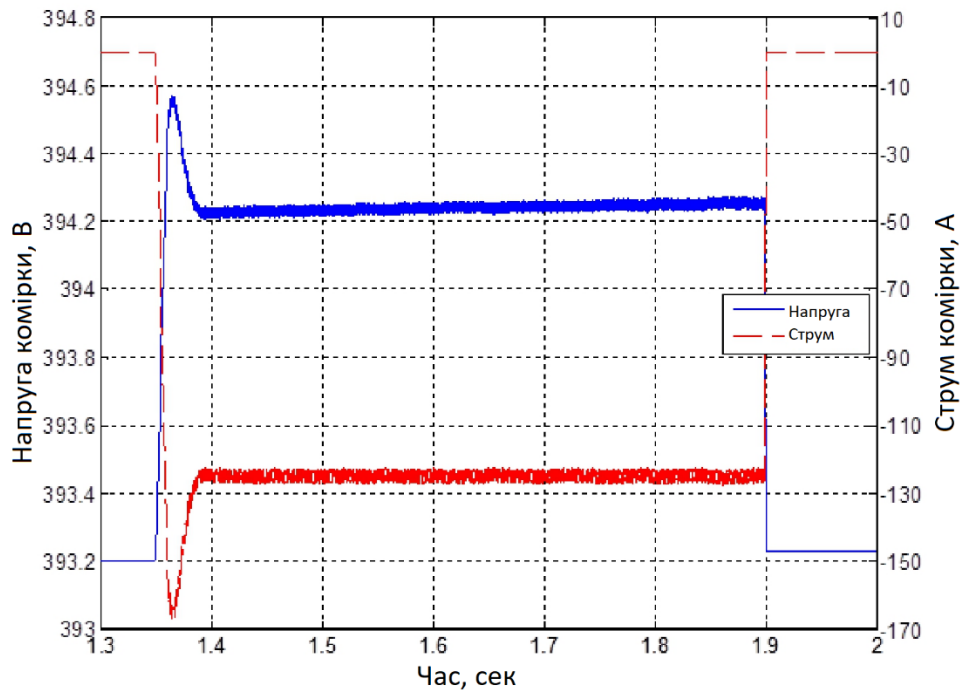


Рисунок 3.8 - Напруга та струм імпульсного заряду акумулятора електромобіля 2

3.4 Моделювання роботи фотоелектричної батареї

Фотоелектрична батарея та підсилюючий перетворювач моделюються в PSCAD, як показано нижче на рисунку 3.9. Компонент фотоелектричної батареї є модифікованою версією загальної моделі, показаної на рисунку 2.15. Три антипаралельні діоди в поєднанні з їх паралельними резисторами налаштовані для забезпечення точної роботи та ключових робочих точок уздовж кривої вихідної потужності фотоелектричної батареї, рисунок 2.16. Робота фотоелектричної батареї детальніше перевірена в [28].

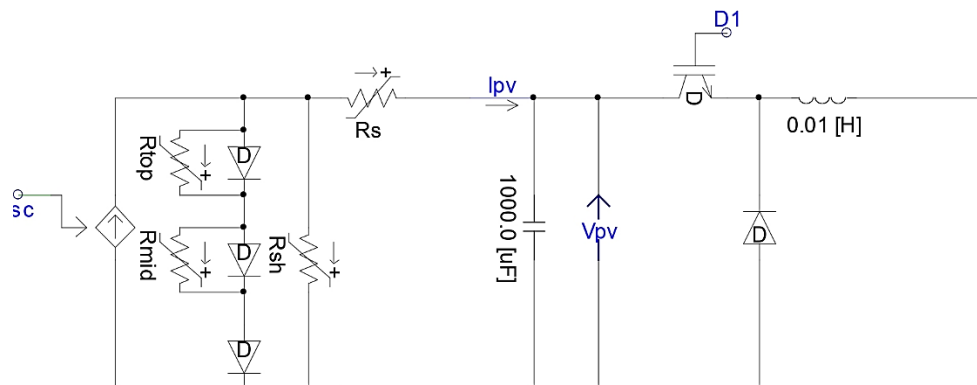


Рисунок 3.9 - Схема фотоелектричної батареї та підвищувального

перетворювача в PSCAD

Алгоритм MPPT з інкрементальною провідністю був впроваджений в PSCAD з використанням логічних вентилів, як показано на рисунку 3.10. Алгоритм MPPT використовується для обчислення опорної напруги, яка використовується для визначення робочого циклу підвищувального перетворювача, пов'язаного з виходом фотоелектричної батареї.

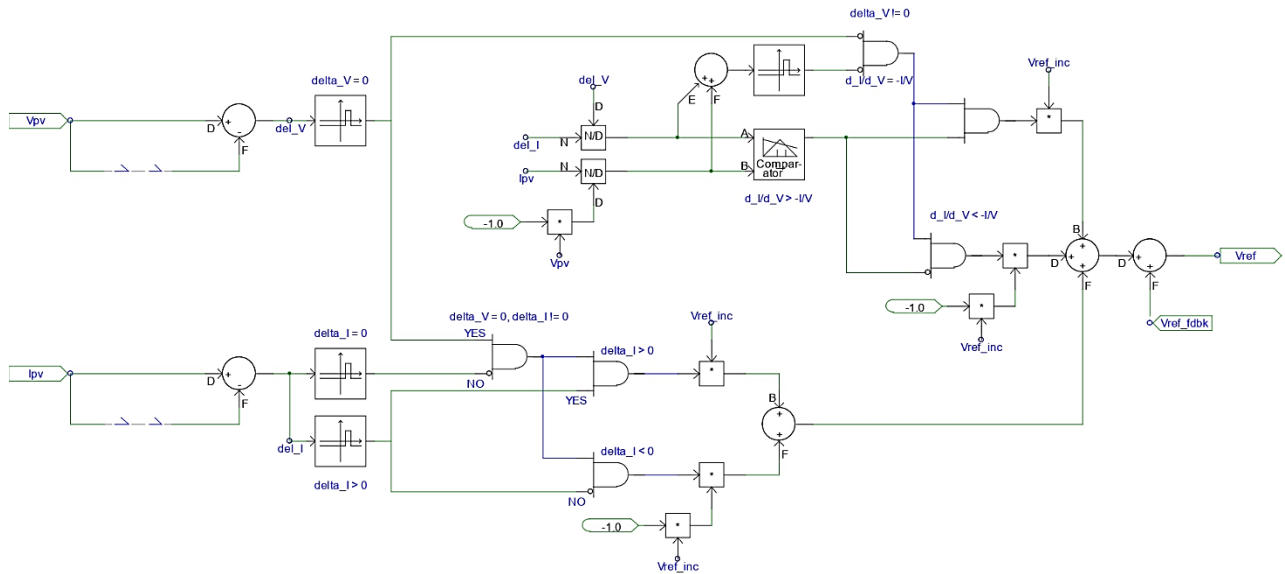


Рисунок 3.10 - Реалізація алгоритму інкрементальної провідності в PSCAD

На рисунку 3.11 нижче показано вихідну потужність фотоелектричної батареї та підсилювача напруги в тестовій системі через навантажувальний резистор 100 Ом. Вихідна потужність фотоелектричної батареї дещо перевищує проектну потужність 20 кВт і становить близько 21 кВт. Це пов'язано з округленням кількості послідовно з'єднаних панелей.

Відповідно до рівнянь у розділі 2, теоретична вихідна потужність фотоелектричної батареї становить $17,4 \cdot n_s \cdot 7,2 \cdot n_p = 21,9$ кВт ($n_p = 5$ і $n_s = 35$).

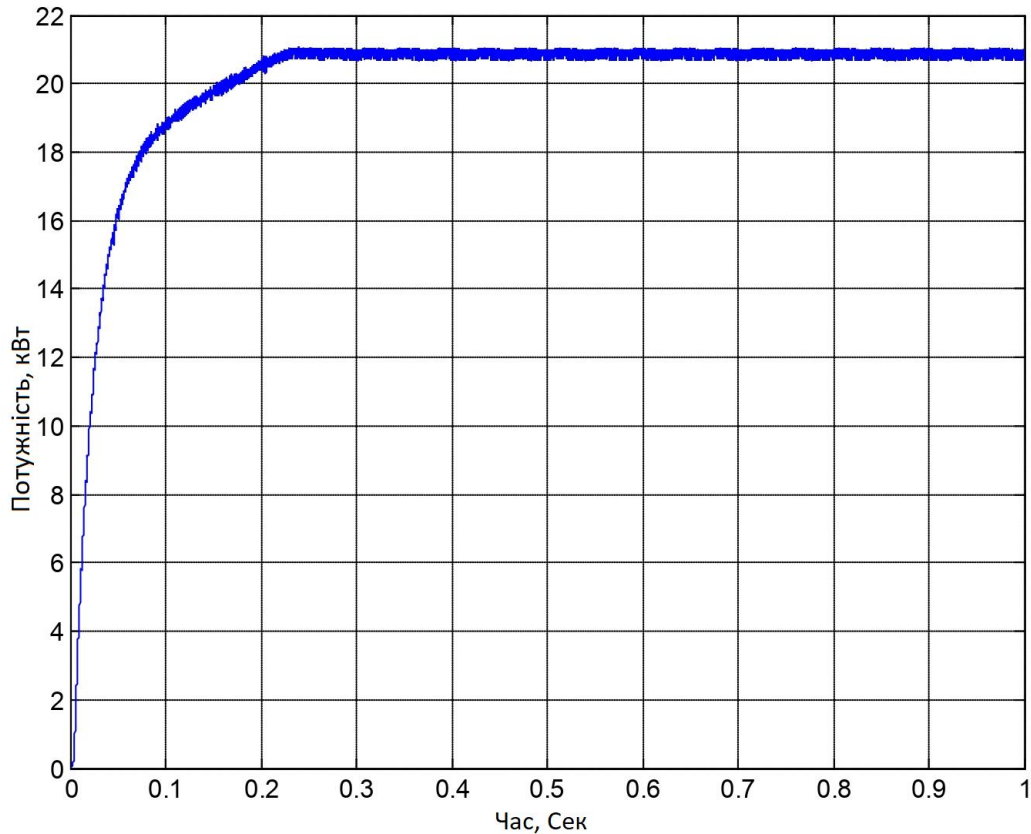


Рисунок 3.11 – Результат моделювання вихідної потужності фотоелектричної батареї

3.5 Аналіз системи, результати розрахунків та моделювання

3.5.1 Загальний аналіз

Нами оцінено взаємодію на рівні системи та роботу зарядної станції для електромобілів з підключенням до повної мережі ПСВН та без нього під час різних режимів роботи СЗЕ. Зарядна станція для електромобілів має два основні режими роботи: коли вона служить виключно навантаженням (зарядання електромобілів та фотоелектрична батарея увімкнена або вимкнена) та коли вона діє як джерело генерації (електромобілі відсутні, а фотоелектрична батарея увімкнена). У цьому розділі буде розглянуто дві моделі: модель з підключенням, в якій СЗЕ підключена до моделі мережі ПСВН, та модель без підключення, в якій мережа ПСВН представлена ідеальним джерелом напруги. Дві різні моделі використовуються для перевірки використання ідеального джерела напруги як відповідного представлення мережі ПСВН, що дозволяє проводити більш швидкі

та складні симуляції, а також визначати, які проблеми є унікальними для моделі мережі ПСВН, що містить реалістичні джерела генерації. У на початку цього розділу досліджується вплив роботи зарядних пристроїв акумуляторів (синхронний понижуючий перетворювач) під час короткого замикання акумулятора. Зокрема, досліджується здатність перетворювача блокувати або поширювати передачу несправностей на основі управління перемиканням силової електроніки. Також обговорюється режим безперервної провідності (ССМ) та режим переривчастої провідності (DCM) двонаправленого перетворювача постійного струму, оскільки це не підкреслюється в літературі [17]. Для точного моделювання та фіксації перемикання силової електроніки використовується невеликий часовий крок (12 мкс).

Для зменшення обсягу пам'яті, необхідної для моделювання, необхідний більший часовий крок (30 мкс). Усі моделювання виконуються з використанням того самого часового кроку, що згадувався раніше. Через обмеження пам'яті, спричинені великою взаємопов'язаною моделлю, що містить п'ять електричних машин, десять силових електронних перетворювачів, сонячну батарею та дві моделі акумуляторів, час моделювання було обмежено до 2,1 секунди.

Час моделювання 2,1 секунди дозволяє фіксувати перехідні та стаціонарні режими роботи у всіх режимах роботи.

3.5.2 Робота СЗЕ з мережею ПСВН і без неї

Розглянемо дві моделі: взаємопов'язана модель, в якій СЗЕ, рисунок 2.1, живиться через пряме підключення до моделі мережі ПСВН, та не взаємопов'язана модель, в якій мережа ПСВН представлена ідеальним джерелом напруги.

Моделювання СЗЕ, що відображає різні режими роботи, триває 2,1 секунди і відповідає режиму роботи, представленою в таблиці 3.1. Літери в стовпці «Стан» використовуються для візуального позначення на рисунках моментів переходу між режимами. Як взаємопов'язана, так і не взаємопов'язана моделі

відповідають режиму роботи, описаному в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Режим роботи для тестування СЗЕ під час різних режимів роботи

Час (Секунди)	Стан	Робота	Режим
0,00	A	Вітрогенератори починають «розігріватися»	Режим очікування
0,50	B	Мережа підключена до СЗЕ	Режим очікування
0,61	C	Фотоелектрична батарея увімкнена	Електроенергія до мережі
1,0	D	Фотоелектрична батарея вимкнена	Режим очікування
1,15	E	Акумулятор EV 1 починає заряджатися	Електроенергія від мережі
1,20	F	Фотоелектрична батарея увімкнена	Електроенергія від мережі та фотоелектричної батареї - 1 заряд акумулятора
1,35	G	Акумулятор 2 електромобіля починає заряджатися	Електроенергія від мережі та фотоелектричної батареї - 2 заряд акумулятора
1,75	H	Фотоелектрична батарея вимкнена	Електроенергія від мережі - 2 заряд акумулятора
1,9	I	Акумулятор 2 електромобіля припиняє заряджатися	Електроенергія від мережі - 1 заряд акумулятора

У взаємопов'язаній моделі шинопровід ПСВН досягає стаціонарної напруги 4,25 кВ. Ця стаціонарна напруга шинопроводу ПСВН використовується як вхідна напруга в не взаємопов'язаній моделі для забезпечення узгодженості між симуляціями. Як вже зазначалося в розділі 2, до двонаправленого перетворювача постійного струму в постійний струм було додано схему попереднього заряджання. Схема попереднього заряду необхідна, оскільки незаряджений конденсатор ϵ , по суті, коротким замиканням, і без окремої схеми попереднього заряду незаряджений конденсатор призведе до збою шини ПСВН. Завдяки додаванню резисторів, з'єднаних послідовно з конденсатором, пусковий струм двонаправлених перетворювачів постійного струму обмежується. Через 0,61 секунди (стан C) сонячна батарея підключається до шини ПСВН і починає подавати 20 кВт енергії, що показано на схемі потоку енергії на рисунку 3.13. Двонаправлений перетворювач постійного струму, що працює в режимі підвищення напруги, буде подавати енергію в мережу ПСВН, регулюючи

напругу шини ПСНН на рівні 1 в.о. (800 В постійного струму), рисунок 3.12, з перевищенням 0,12 п.о. Зверніть увагу, що рисунок 3.24 має іншу шкалу часу, це зроблено для забезпечення максимальної роздільної здатності в робочому діапазоні шини ПСНН. Через 1,00 секунду (стан D) фотоелектрична батарея вимикається, і СЗЕ переходить у режим очікування, в якому в системі протікає мінімальна потужність; зверніть увагу, що під час цього періоду очікування напруга шини ПСНН, рисунок 3.12, регулюється до 1,0 в.о. за допомогою демпфуючого контуру з перехідним перевищенням 0,11 в.о. Через 1,15 секунди (стан E) перший електромобіль починає заряджатися з потужністю приблизно 50 кВт, що спричиняє недосягнення 0,09 в.о. На 1,20 секунді (стан F) фотоелектрична батарея вмикається, забезпечуючи потужність 20 кВт. Знову двонаправлений перетворювач постійного струму регулює напругу шини ПСНН до 1,0 в.о. з перевищенням 0,07 в.о. Через 1,35 секунди (стан G) другий електромобіль починає заряджатися з потужністю приблизно 50 кВт, що спричиняє недосягнення напруги 0,06 в.о. Через 1,75 секунди (стан H) фотоелектрична батарея вимикається, що означає, що всі 100 кВт навантаження постачаються через двонаправлений перетворювач постійного струму. Протягом цього періоду пульсація напруги шини ПСНН досягає 6,625%. Нарешті, через 1,9 секунди (стан I) EV 2 припиняє заряджання. Зверніть увагу, що як у невідключених, так і в підключених моделях двонаправлений перетворювач постійного струму в постійний струм здатний належним чином регулювати напругу шини ПСНН, рисунок 3.12, як з ідеальною вхідною напругою, так і без неї, рисунок 3.11. Двонаправлений перетворювач постійного струму в постійний струм здатний належним чином забезпечити ізоляцію між змінами навантаження, що відбуваються на шині ПСНН, та шиною ПСВН, що показано на рисунку 3.11. Єдине збурення напруги шини ПСВН, спричинене СЗЕ, відбувається, коли вхідна сторона двонаправленого перетворювача постійного струму в постійний струм вимикає схему попереднього заряду; шина ПСВН має короткочасне падіння напруги до 0,8 в.о., що відповідає перехідному процесу при якому напруга зменшується на 0,25 в.о., рисунок 3.11.

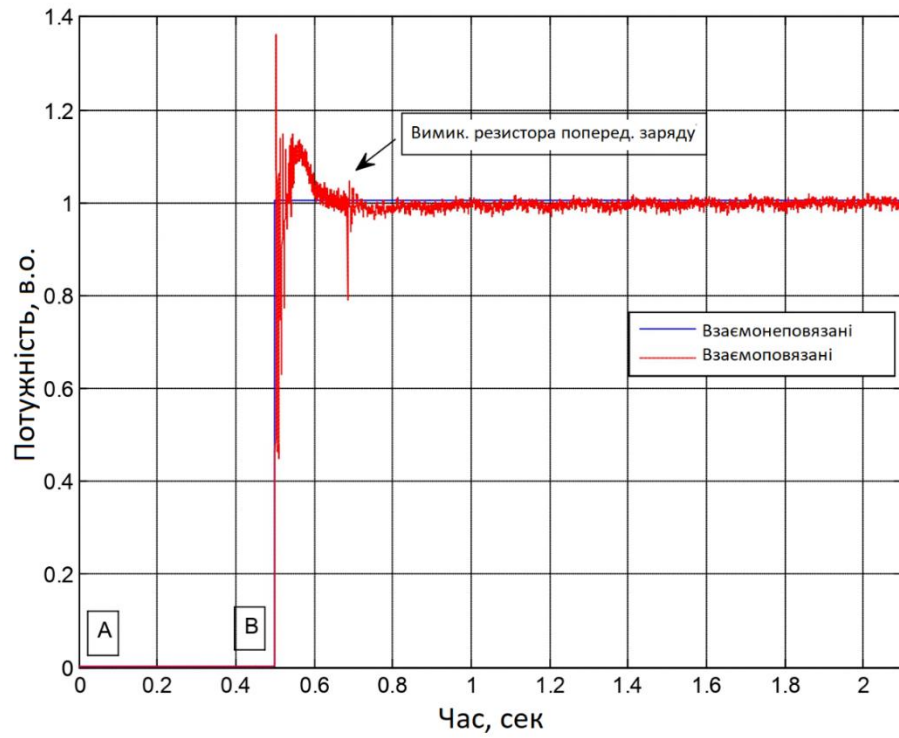


Рисунок 3.11 - Напряга шини ПСВН

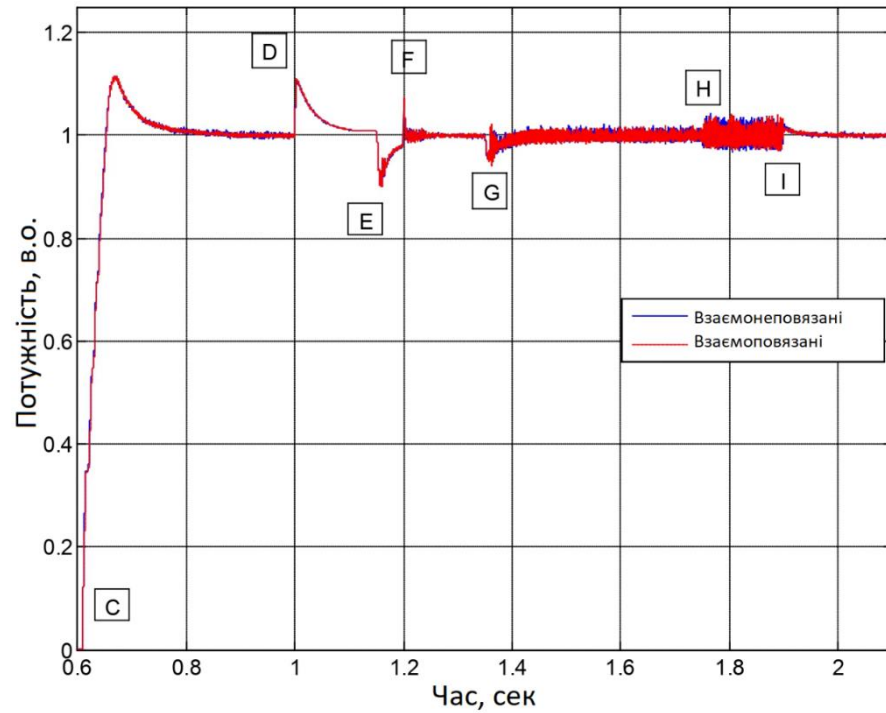


Рисунок 3.12 - Напряга шини ПСНН

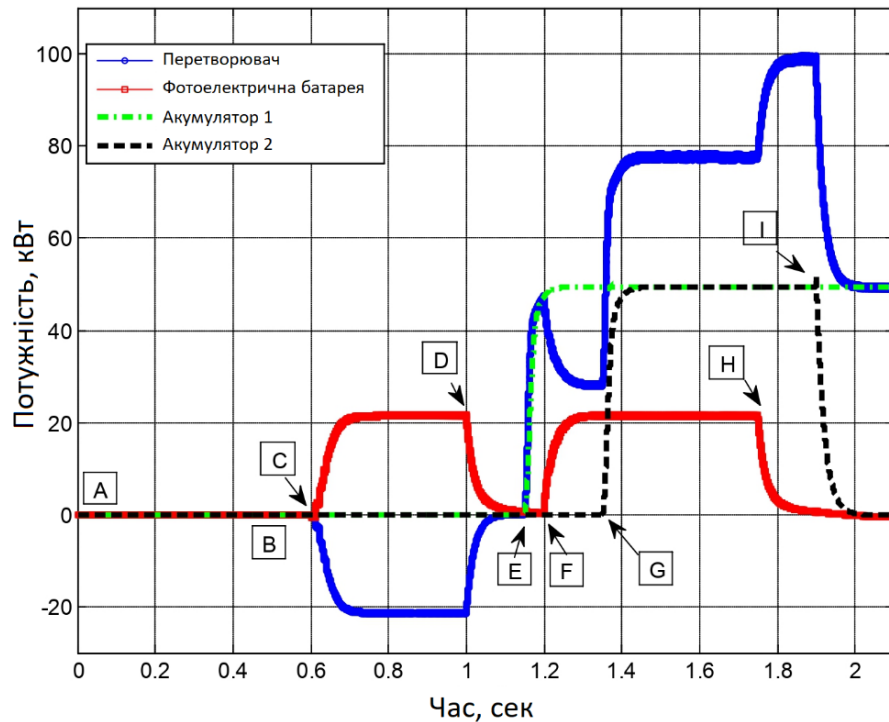


Рисунок 3.13 - Спожита та отримана потужність в СЗЕ

Як вже зазначалося раніше, система СЗЕ була протестована з використанням як ідеального джерела напруги (непідключена модель), так і мережі ПСВН (підключена модель). Мережа ПСВН забезпечує регульовану напругу шини 4,25 кВ постійного струму. Модель мережі ПСВН, використовує вітрогенератори PMSG як джерело енергії, що призводить до того, що напруга шини ПСВН є неідеальною і містить гармонічні складові. Як показано раніше на рисунку 3.12, як у взаємопов'язаній, так і в не взаємопов'язаній моделі двонаправлений перетворювач постійного струму регулює напругу шини ПСНН до бажаного значення 800 В постійного струму. У непідключеній моделі вхідний струм у двонаправлений перетворювач постійного струму є ідеальним і, як очікується, таким і залишається (рисунок 2.6). Однак у підключеній моделі вхідний струм є неідеальним. Незважаючи на дуже різні вхідні струми, двонаправлений перетворювач постійного струму належним чином регулює вихідний струм в обох системах,.

Незалежно від вхідного струму, двонаправлений перетворювач постійного струму належним чином регулює вихідну напругу та струм, що означає, що

використання ідеального джерела напруги є дійсним методом для тестування систем, розташованих нижче за перетворювачем.

3.5.3 Перехідні процеси в синхронному перетворювачі

Розглянемо вплив міжфазної несправності (короткого замикання) на вхідному терміналі акумулятора електромобіля під час заряджання, зокрема, вплив стану перемикачів силової електроніки синхронного перетворювача на поширення несправності. На рисунку 3.14 показана конфігурація системи СЗЕ на момент виникнення несправності.

Усі перемикачі в СЗЕ закриті, два електромобілі заряджаються з потужністю 50 кВт, 20 кВт потужності подається від фотоелектричної батареї, а решта 80 кВт — від мережі ПСВН, система перебуває в стані рівноваги.

Через 0,5 секунди на клеммах акумулятора електромобіля 1 виникає коротке замикання. Через 0,6 секунди синхронний понижуючий перетворювач (рисунок 2.10) припиняє перемикачів силової електроніки, обидва перемикачі відкриті. Через 0,7 секунди несправність усувається, а через 0,8 секунди синхронний понижуючий перетворювач відновлює роботу. Робота в умовах несправності описана в таблиці 3.2. Ця симуляція передбачає, що акумулятор здатний витримати 0,2-секундну несправність без катастрофічного виходу з ладу або перегорання запобіжника. У реальному житті виявлення несправності та зупинка роботи синхронного понижуючого перетворювача відбуваються швидше, ніж за 0,1 секунди.

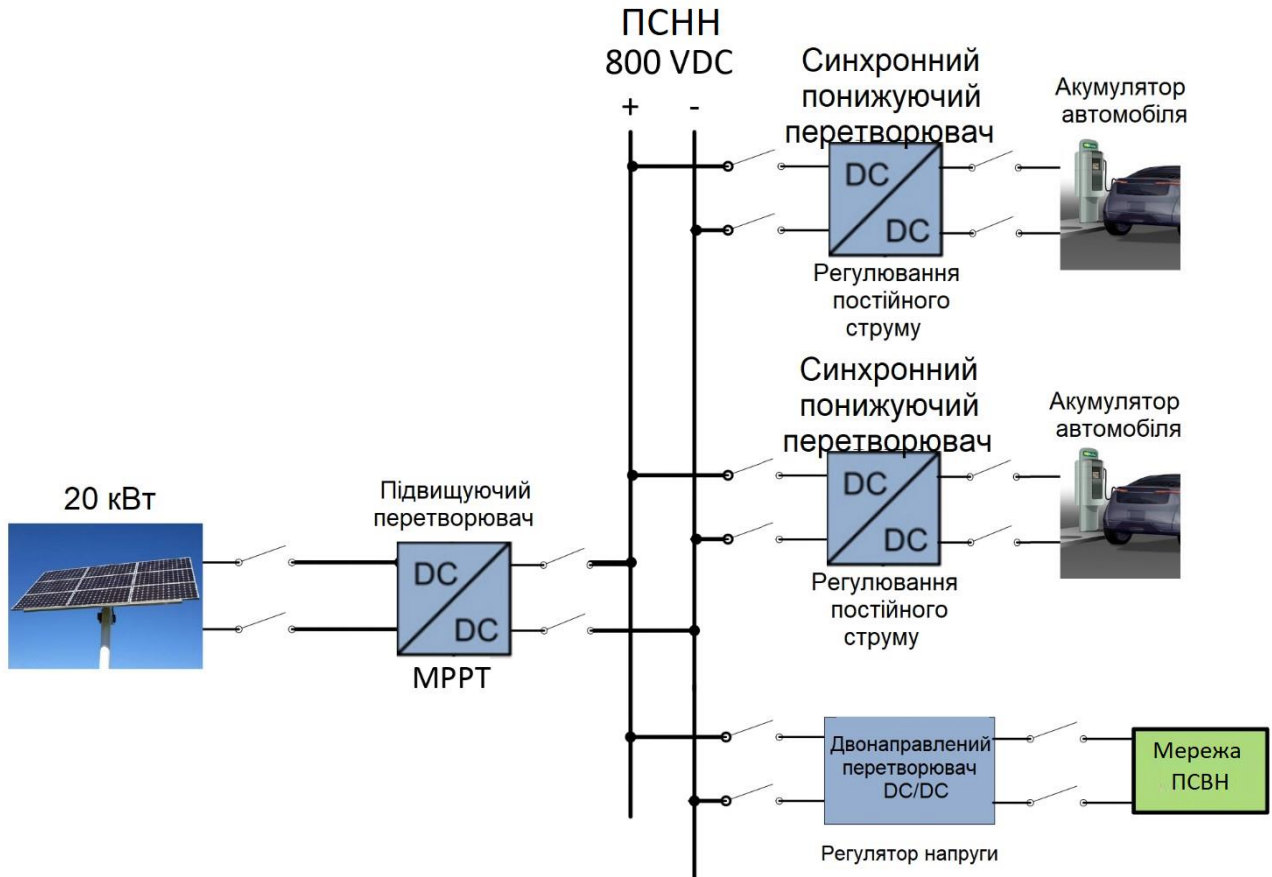


Рисунок 3.14 - Помилка між фазами, що застосовується до клеми електромобіля під час заряджання

Таблиця 3.2 - Режими роботи для тесту на помилку СЗЕ

Час (секунди)	Операція
0,5	Помилка між фазами на клеммах 1 акумулятора електромобіля
0,6	Синхронний понижуючий перетворювач припиняє роботу
0,7	Помилка усувається
0,8	Синхронний понижуючий перетворювач відновлює роботу

На рисунку 3.15 показано потік потужності в моделі СЗЕ в стаціонарних умовах і під час несправності. Масштаб рисунка дозволяє побачити проміжок часу від 0,4 до 1 секунди, що підкреслює вплив несправності на систему. Коли несправність починається на 0,5 секунди, система перебуває в стаціонарних умовах. Несправність починається на 0,5 секунди і призводить до падіння

потужності, що подається на акумулятор 1, до 37,5 кВт. Мережа живить несправність через те, що синхронний понижуючий перетворювач використовує постійне регулювання струму, що означає, що синхронний понижуючий перетворювач продовжує подавати струм 125 А до несправності акумулятора при зниженій напрузі. На 0,6 секунди перетворювач ідентифікує несправність і зупиняє перемикання силової електроніки, ізолюючи несправність від шини ПСНН. На 0,7 секунди несправність усувається, а на 0,8 секунди синхронний понижуючий перетворювач відновлює роботу в стаціонарному режимі, подаючи 50 кВт потужності на акумулятор електромобіля.

На рисунку 3.16 показано напругу на шині ПСНН і вихідну напругу синхронних перетворювачів під час несправності. Синхронний понижуючий перетворювач, що використовує постійний контроль струму і відповідні методи ізоляції, запобігає падінню напруги шини ПСНН внаслідок несправності, щоб інші компоненти могли продовжувати роботу. Протягом тривалості несправності (від 0,5 до 0,7 секунди) вихідна потужність синхронних понижуючих перетворювачів знижується до 300 В з постійного значення 400 В. Вихідна напруга 300 В спричинена зниженням напруги на клеммах акумулятора під час короткого замикання і відповідає інформації, наведеній у літературі [29].

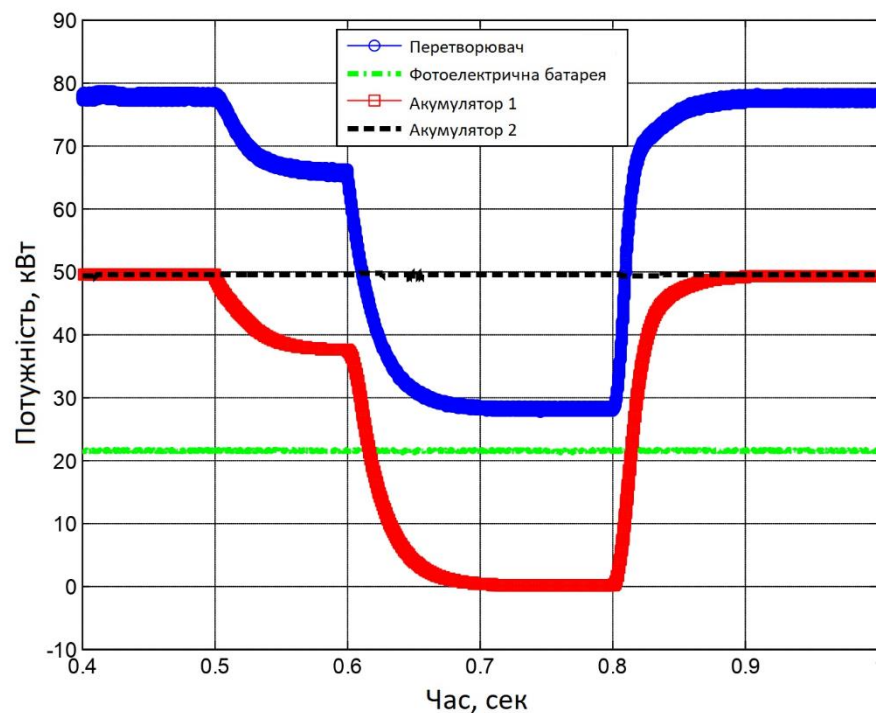


Рисунок 3.15 - Поглинена та отримана потужність компонентів СЗЕ під

час роботи в умовах несправності

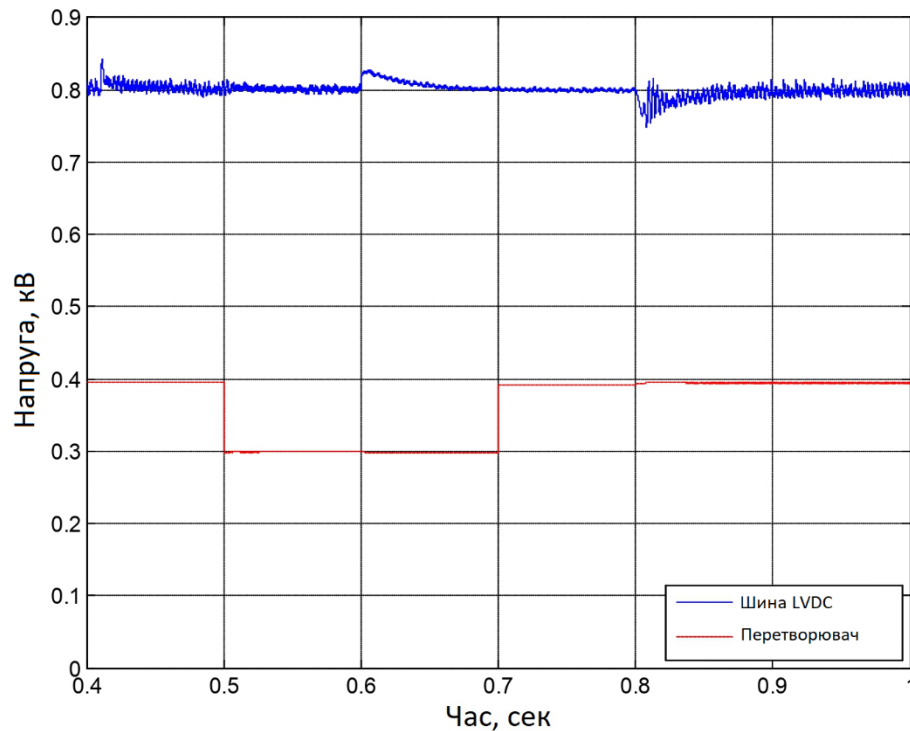


Рисунок 3.16 - Напруга шини ПСНН та вихідна напруга синхронного понижуючого перетворювача під час роботи в умовах несправності

Отже порівняно роботу СЗЕ при підключенні до мережі ПСВН та при живленні від ідеального джерела напруги. Робота СЗЕ була однаковою незалежно від джерела живлення завдяки ізоляційним можливостям двонаправленого перетворювача постійного струму. За допомогою використання обмежених джерел живлення в мережі ПСВН були виявлені обмеження двонаправленого перетворювача постійного струму. Зокрема, було підкреслено необхідність додавання схеми попереднього заряджання.

Досліджена здатність синхронного понижувального перетворювача ізолювати несправності в системах живлення постійного струму наступного покоління. Під час заряджання електромобіля на повну потужність було проведено випробування на коротке замикання акумулятора. Завдяки характеру короткого замикання акумулятора та постійному контролю струму, що використовується зарядним пристроєм (синхронним понижувальним перетворювачем), СЗЕ забезпечив мінімальний струм до несправності

аккумулятора; однак, це все одно мало вплив. Для усунення несправності необхідні відповідні вимірювальні прилади та засоби контролю для виявлення несправностей аккумулятора та зупинки роботи зарядного пристрою, ізолюючи несправність аккумулятора від решти СЗЕ.

3.6 Висновки до розділу

1. Реалізовано комплексну модель СЗЕ, яка об'єднує двонаправлений перетворювач постійного струму, синхронний понижуючий перетворювач, лінійну модель аккумулятора, підвищувальний перетворювач та фотоелектричну батарею в єдиній системі з шиною ПСНН 800 В.

2. Двонаправлений перетворювач забезпечує регулювання напруги шини ПСНН на рівні 800 В у стаціонарних і перехідних режимах. Теоретично розрахований робочий цикл $D = 0,565$ підтверджено моделюванням ($D = 0,552$), відхилення пояснюється низькочастотними пульсаціями системи.

3. Синхронний понижуючий перетворювач забезпечує заряджання аккумулятора постійним струмом 125 А при напрузі ~ 394 В (потужність 49,3 кВт), що відповідає режиму швидкої зарядки постійного струму рівня 2. Лінійна модель аккумулятора адекватно описує процес заряджання LFP-батареї в кінці циклу СС при 95 % SOC.

4. Фотоелектрична батарея на базі модулів KC125G із алгоритмом MPPT з інкрементальною провідністю забезпечує вихідну потужність ~ 21 кВт (проектна 20 кВт). Алгоритм MPPT дозволяє підтримувати роботу фотоелектричної батареї в точці максимальної потужності.

5. Двонаправлений перетворювач постійного струму коректно функціонує як при підключенні до мережі ПСВН, так і при живленні від ідеального джерела напруги, що підтверджує можливість використання спрощеного джерела напруги для моделювання компонентів нижче за перетворювач.

6. Синхронний понижуючий перетворювач здатний ізолювати несправність типу короткого замикання аккумулятора від шини ПСНН: після

виявлення несправності перетворювач припиняє перемикання, зберігаючи працездатність інших компонентів СЗЕ.

7. Проведене моделювання підтверджує працездатність запропонованої архітектури СЗЕ та коректність обраних параметрів компонентів, що дає підстави для подальшого фізичного прототипування зарядної станції постійного струму.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання

Загальні вимоги безпеки до конструкції виробничого обладнання встановлені ДНАОП.

Безпека виробничого обладнання забезпечується [30]:

- 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, кромок 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 Фізичні основи електробезпеки

Величина струму, що проходить через тіло людини при її попаданні під напругу, в найбільшій мірі визначає тяжкість ураження. Для розробки технічних і організаційно-технічних заходів і засобів профілактики електротравм важливо знати, від яких конструктивних особливостей електроустановок, їх робочих параметрів і стану залежить можлива величина струму через людину при потраплянні під напругу. Крім того, важливо, щоб весь електротехнічний персонал, усі працівники, робота яких пов'язана з експлуатацією електроустановок, чітко розуміли, чим обумовлена, що є причиною тієї чи іншої вимоги з електробезпеки. Таке знання, розуміння вимог чинних нормативів з електробезпеки сприятиме дотриманню їх працівниками, і якраз розуміння цих вимог відрізняє працівників п'ятої групи з електробезпеки від четвертої, і є обов'язковою складовою їх професійної підготовки з питань безпеки [30].

У реальній електричній мережі (повітряній чи кабельній) опір ізоляції проводів відносно землі розподіляється по всій довжині мережі — опорні, підвісні, натяжні ізолятори, ізоляція кабелю. Чим більша протяжність мережі, тим більше ізоляторів, які працюють паралельно, і менший загальний опір

ізоляції проводів відносно землі. Необхідний опір ізоляції регламентується чинними нормативами. На практиці ізоляція струмопроводів виконується з реальних діелектриків, питомий опір яких не дорівнює нескінченності. Внаслідок старіння ізоляції, її частого зволоження, забруднення, нагріву, дії агресивного середовища тощо, питомий опір ізоляції знижується. Тому кожна ділянка довжини проводу має опір ізоляції певного значення або провідність, яка відрізняється від нуля, а при роботі реальної мережі мають місце постійні втрати струму (виток струму) через ізоляцію і землю. Таким чином, незважаючи на наявність ізоляції, струмопроводи електромережі електрично зв'язані між собою і землею провідниками (ізоляцію) з великим опором.

Відповідно до зазначеного вище, кожна ділянка довжини проводу електромережі, що знаходиться під напругою, крім опору ізоляції має певну ємність відносно землі. Тому при дотиці людини до неізольованої струмовідної частини (проводу тощо) функціонуючої електромережі струм через людину обумовлюється величиною напруги дотику і ємністю зазначеної вище системи. Ємнісна складова струму через людину при потраплянні під напругу в розгалужених мережах може досягати небезпечних для людини значень. Тому навіть при відключенні мережі від джерела живлення для ремонтно-профілактичних робіт тощо, необхідно заземлити кожен провід переносним заземленням і тільки після цього та перевірки відсутності напруги допускати персонал до роботи.

4.3 Причини електротравм, напруга кроку

Як і при інших видах травм, при електротравмах виділяють технічні, організаційно-технічні, організаційні і організаційно-соціальні їх причини [30].

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.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналітичний огляд інфраструктури заряджання електромобілів. Встановлено, що зарядні станції постійного струму (DC, 50-350 кВт) забезпечують заряджання до 80 % ємності акумулятора за 20-40 хв. Визначено, що моделі еквівалентних схем (похибка 1-5 %) є оптимальним інструментом для моделювання акумуляторів у складі енергосистем.

2. Проаналізовано системи акумулювання електроенергії. Визначено, що акумуляторні технології є перспективним напрямком для інтеграції зі станціями заряджання на відміну від гідроакумуляційних електростанцій та CAES, які потребують спеціальних геологічних умов.

3. Розроблено архітектуру станції зарядки електромобілів на шині постійного струму низької напруги 800 В. Визначено параметри компонентів: двонаправлений перетворювач (800 В ↔ 4,25 кВ), синхронний понижуючий перетворювач (50 кВт), лінійна модель акумулятора (600 В, 22 А·год, LFP) та фотоелектрична батарея (20 кВт) з підсилювальним перетворювачем та алгоритмом MPPT.

4. У програмному середовищі PSCAD реалізовано комплексну модель станції зарядки електромобілів. Моделювання підтвердило працездатність двонаправленого перетворювача: стабілізація напруги шини 800 В при $D = 0,552$ (теоретичне значення 0,565). Підтверджено коректність роботи режимів підвищення та пониження напруги.

5. Встановлено, що синхронний понижуючий перетворювач забезпечує заряджання постійним струмом 125 А при нарузі ~394 В (потужність 49,3 кВт), що відповідає режиму швидкої зарядки постійного струму рівня 2. Лінійна модель акумулятора адекватно описує процес заряджання LFP-батареї при 95 % SOC.

6. Фотоелектрична батарея на модулях KC125G із контролером MPPT забезпечує вихідну потужність ~21 кВт при проєктній 20 кВт. Підтверджено

здатність алгоритму підтримувати роботу фотоелектричної батареї в точці максимальної потужності.

7. Результати моделювання підтверджують працездатність запропонованої архітектури станції зарядки електромобілів та коректність обраних параметрів компонентів. Отримані технічні рішення дають підстави для подальшого фізичного прототипування зарядної станції постійного струму з інтеграцією відновлюваних джерел енергії.

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. Левчук П. П. Зарядка електричних транспортних засобів на основі безпровідної передачі енергії / П. П. Левчук, В. П. Коваль // Збірник тез доповідей ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — Том 2. — С. 117.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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 (ITTAР 2023). Ternopil, Ukraine, November 22-24, 2023, Vol. 3628, Pages 574-585.

8. 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)

9. 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

10. 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 .

11. 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.

12. Chen, M., & Rincon-Mora, G. A. (2006). Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and IV performance. *IEEE transactions on energy conversion*, 21(2), 504-511.

13. Dees, D. W., Battaglia, V. S., & Bélanger, A. (2002). Electrochemical modeling of lithium polymer batteries. *Journal of power sources*, 110(2), 310-320.

14. Joos, G., De Freige, M., & Dubois, M. (2010, August). Design and simulation of a fast charging station for PHEV/EV batteries. In *2010 IEEE Electrical Power & Energy Conference* (pp. 1-5). IEEE.

15. Salomonsson, D., Soder, L., & Sannino, A. (2009). Protection of low-voltage DC microgrids. *IEEE Transactions on power delivery*, 24(3), 1045-1053.

16. Kisacikoglu, M. C., Ozpineci, B., & Tolbert, L. M. (2011, May). Reactive power operation analysis of a single-phase EV/PHEV bidirectional battery charger. In *8th International conference on power electronics-ECCE Asia* (pp. 585-592). IEEE.

17. Chung, I. Y., Liu, W., Andrus, M., Schoder, K., Leng, S., Cartes, D. A., & Steurer, M. (2009, April). Integration of a bi-directional dc-dc converter model into a large-scale system simulation of a shipboard MVDC power system. In *2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium* (pp. 318-325). IEEE.

18. Chung, I. Y., Liu, W., Schoder, K., & Cartes, D. A. (2011). Integration of a bi-directional DC–DC converter model into a real-time system simulation of a shipboard medium voltage DC system. *Electric Power Systems Research*, 81(4), 1051-1059.

19. Traube, J., Lu, F., & Maksimovic, D. (2012, February). Electric vehicle DC charger integrated within a photovoltaic power system. In *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 352-358). IEEE.

20. Гергега С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей /

Степан Гергега, 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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

24. 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)

25. 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

26. 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.

27. 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.

28. Reed, G. F., Grainger, B. M., Sparacino, A. R., Kerestes, R. J., & Korytowski, M. J. (2012, May). Advancements in medium voltage DC architecture development with applications for powering electric vehicle charging stations. In 2012 IEEE Energytech (pp. 1-8). IEEE.

29. Kallfaß, C., Hoch, C., Hilger, A., & Manke, I. (2012, March). Short-circuit and overcharge behaviour of some lithium ion batteries. In International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (pp. 1-5). IEEE.

30. 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