

Міністерство освіти і науки
України
Національний технічний
університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут Електроенергетики
(інститут)

Електротехнічний
факультет
(факультет)

Кафедра електроенергетики
(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА
ЗАПИСКА**

кваліфікаційної роботи ступеню магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Савченка Миколи Миколайовича
(ПІБ)

академічної групи 141М-21-1
(шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)

спеціалізації

за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка
та

електромеханіка

на тему Розробка електричної частини та моделювання режимів роботи
сонячної станції потужністю 40 МВт

(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи				
розділів:				
Технологічний	Випанасенко І.В			
Спеціальний	Випанасенко І.В			
Економічний	Тимошенко Л.В.			
Рецензент	Щебленко Є.Ю.			
Нормоконтролер	Олішевський Г.С.			

Дніпро НТУ «ДП»

2022

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри

електроенергетики
(повна назва)

Папаїка Ю.А.

(підпис)(прізвище, ініціали)

«_____»

_____ 20__ 22 року

ЗАВДАННЯ
на
кваліфікаційну
роботу ступеню
Магістра

(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студенту Савченко М.М. академічної групи 141М-21-1
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка спеціалізації

за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(офіційна назва)

на тему Розробка електричної частини та моделювання режимів роботи
сонячної станції потужністю 40 МВт

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 13.09.22
№918-с

Розділ	Зміст	Термін виконання
Технологічний	Теоретична інформація, особливості будівництва фотоелектричних станцій та вимоги законодавства що до їх спорудження. Особливості приєднання фотоелектричної станції до мережі змінного струму.	
Спеціальний	Практичні розрахунки та аналіз мережі постійного струму фотоелектричної станції, визначення параметрів електричного обладнання станції.	
Економічний	Економічне обґрунтування обсягу генерації електроенергії.	

Завдання видано

_____ (підпис керівника)

Випанасенко І.В.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі _____

Дата подання до екзаменаційної комісії _____

Прийнято до виконання

_____ (підпис студента)

Савченко М.М.

(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 95 стор., 82 рис., 18 джерел.

Об'єкт дипломного проекту: Сонячна електростанція потужністю 40 МВт

Мета дипломного проекту: Розробка електричної частини та моделювання режимів роботи сонячної станції потужністю 40 МВт

У основній частині були розглянуті багато електростанцій, а також особливості будівництва фотоелектричних станцій та вимоги законодавства, щодо їх спорудження, був зроблений аналіз та характерні режими роботи сонячної енергетики в Україні.

Економічним обґрунтуванням проекту було досліджено режими роботи напівпровідникового приладу – інвертора і як він впливає на показники якості електричної енергії.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: УКРАЇНА ,ЕФЕКТИВНІСТЬ, ЯКІСТЬ НАПРУГИ, ЛІНІЯ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ, СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, ВТРАТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ, ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ

Зміст

Вступ.....	1
1 Основна частина.....	3
1.1 Теоретична частина.....	3
1.2 Аналіз мережі постійного струму фотоелектричної станції.....	5
1.3 Особливості приєднання фотоелектричної станції до мережі змінного струму	7
1.4 Аналіз та характерні режими роботи сонячної енергетики в Україні.....	14
1.5 Аналіз принципу роботи та типу сонячних панелей	20
1.6 Падаюче випромінювання на поверхню Землі.....	22
1.6.1 Випромінювання на похилих та відстежуючих поверхнях	23
1.7 Збільшення енергії в системах стеження	26
1.8 Методи стеження Сонця.....	27
1.8.1 Висновки до розділу 1	28
2. Особливості отримання електроенергії від СЕС	28
2.1 Застосування енергії сонця в енергетиці.....	28
2.2 Види сонячних станцій.....	31
2.3 Застосування сонячних променів у фотоелектричних станціях. Принципи роботи.....	34
2.4 Схеми роботи фотоелектричних сонячних станцій. Додаткове обладнання	38
2.4.1 Моделювання мережі	43
2.4.2 Моделювання акумуляторної батареї.....	50
2.4.3 Моделювання трифазного інвертора.....	51
2.4.4 Моделювання блоку керування інвертором.....	54
2.4.5 Перетворення для створення контурів напругу і струму	59
2.4.6 Моделювання навантаження.....	61
2.5 Моделювання підстанції.....	63
2.5.1 Моделювання ланцюгів споживачів.....	63
2.5.2 Розрахунок силового активного фільтру.....	68
2.5.3 Системи управління.....	68
2.5.4 Розрахунок конденсатора.....	75
2.6 Результати моделювання.....	77
2.6.1 Підтримка напруги в режимі веденого.....	77
2.6.2 Підтримка напруги в режимі ведучого.....	79
2.6.3 Підтримка напруги з переходом з режиму ведучого в режим веденого.....	81

2.6.4 Результати моделювання і порівняльний аналіз технічних засобів по покращенню якості електроенергії.....	84
3. Економічна частина.....	88
Висновок.....	92
Список використаних джерел.....	93
ДодатокА.....	95

ВСТУП

Практично всі джерела енергії, які користується нині людством, є сонячним походженням. Органічні палива (вугілля, нафта, газ та інше) – це акумульована сонячна енергія. Перетвореною сонячною енергією є енергія вітру, річок, припливів, хвиль. Близько 30% сонячного випромінювання відбивається атмосферою Землі, а ще 20% поглинається.

В результаті лише 50% його досягає поверхні нашої планети, але це еквівалентно всієї енергії, що виробляється приблизно 170 мільйонами найпотужніших електростанцій світу. Введення в експлуатацію сонячних станцій дуже позитивно позначиться на економії ресурсів країни, а також буде помічено покращення екологічної ситуації.

Україна є енергодефіцитною країною та імпортує близько 75% енергоносіїв. Також українська промисловість є досить енергоємною, оскільки в 3-5 рази перевищує відповідні показники економічно розвинутих країн, тому Україна є надзвичайно чутлива до умов імпортування природних енергоносіїв.

Використання відновлювальних джерел енергії є одним із найбільш важливих напрямів енергетичної політики України. Збільшення частки використання відновлювальних джерел енергії в енергетичній системі України сприятиме підвищенню диверсифікації джерел енергоносіїв, що, в свою чергу, сприятиме зміцненню енергетичної незалежності країни.

На сьогодні є дуже актуальне питання виробництва електричної енергії з відновлювальних джерел енергії, одним з найперспективнішим напрямком такого виробництва є використання сонячної інсоляції. Географічне положення України дає потенціал сонячного випромінювання до 1400 кВт·год/м², однак слід зазначити що найефективніше використання сонячних установок є можливим протягом п'яти, семи місяців в залежності від дислокації самої СЕС.

Метою випускної кваліфікаційної роботи є розробка електричної частини та моделювання режимів роботи сонячної станції потужністю 40 МВт.

Для досягнення поставленої мети в випускній кваліфікаційній роботі необхідно вирішити наступні завдання:

1. Визначити особливості будівництва фотоелектричних станцій та вимоги законодавства, щодо їх спорудження.
2. Виконати аналіз мережі постійного струму фотоелектричної станції.
3. Розглянути особливості приєднання фотоелектричної станції до мережі змінного струму,
4. Розрахувати і визначити параметри електричного обладнання станції.
5. Оцінити обсяг генерації електроенергії.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ

1.1. Особливості будівництва фотоелектричних станцій та вимоги законодавства, щодо їх спорудження

Обов'язок виробників продавати електричну енергію виключно на електронних аукціонах суперечить основним ідеям вільного ринку, які мали бути досягті введенням нової моделі ринку у 2019-му році та прийняттям Закону України «Про ринок електричної енергії». Так, згідно пункту 1 частини третьої статті 30 цього Закону, виробник має право на вільний вибір контрагента за двостороннім договором. Аналогічні права на вільний вибір контрагентів за двосторонніми договорами закріплене і за іншими учасниками ринку: трейдерами (пункт 2 частини першої статті 55 Закону), електропостачальниками (пункт 2 частини першої статті 57 Закону) та споживачами (пункт 1 частини першої статті 58 Закону).

Однак, слід звернути увагу на українські реалії ринку та на той факт, що ринок перебуває у початковому стані - формування та становлення.

Як вже зазначалося вище, з початку введення в дію нової моделі ринку електричної енергії у липні 2019-го року, обов'язок продавати вироблену електричну енергію виключно на електронних аукціонах покладался лише на виробників, частка власності у яких більше 50 відсотків належала державі або громаді (комунальна власність). Ця норма ставила в нерівні умови виробників електроенергії приватної, державної та комунальної форм власності між собою. Тому умови мали бути однакові для всіх - або вільний вибір контрагентів або ж продаж на електронних аукціонах. Була введена тимчасова

норма обов'язку продажу виробленої електричної енергії виключно на електронних аукціонах для усіх виробників з 1 вересня 2021 року до 1 квітня 2022 року. На електронних аукціонах з продажу електричної енергії приватними виробниками за період з вересня по грудень 2020 року було реалізовано 222,5 тис. МВт-год. електроенергії, а за вересень-грудень 2021 року реалізовано 8,01 млн. МВт-год. електроенергії, що у 36 разів більше за аналогічний період 2020 року. Кількість підписаних аукціонних свідоцтв у 2021 році зросла майже у 9 разів у порівнянні з 2020 роком, кількість учасників-контрагентів приватної генерації у 2021 році також зазнала суттєвого збільшення. До того ж, Антимонопольним комітетом України у своїх рекомендаціях неодноразово зазначалося, що з метою забезпечення функціонування ринку двосторонніх договорів на конкурентних засадах, забезпечення прозорості та реальної конкуренції на ринку двосторонніх договорів, необхідним є запровадження заходів щодо здійснення на постійній основі продажу електричної енергії за двосторонніми договорами всіма виробниками електричної енергії незалежно від форми власності, що призведе до створення сприятливих умов для конкуренції як серед виробників, так і серед покупців.

Тому законодавець вирішив, що обов'язок продажу усієї виробленої електричної енергії на електронних аукціонах на цьому етапі становлення ринку в Україні є найбільш доцільним. Тут слід відмітити, що навіть після втрати юридичної сили тимчасової норми, про яку йшлося вище (після 1 квітня цього року) більшість суб'єктів приватної генерації продовжили продаж виробленої ними електричної енергії на електронних аукціонах. А, наприклад, у Польщі, пройшовши аналогічний етап становлення та отримавши досвід використання електронних аукціонів, учасники ринку продовжили таку практику торгівлі і надалі. Також слід врахувати високий рівень корупційних ризиків та використання державної власності у приватних інтересах, що спричиняє значні збитки державній генерації.

Окремо слід зупинитися на процедурі визначення суб'єкта господарювання, який організовує та проводить електронні аукціони з продажу електроенергії за двосторонніми договорами.

Так, згідно того ж Порядку-499, такий суб'єкт господарювання визначається шляхом проведення конкурсу, який проводить комісія на базі Міністерства енергетики України. Сьогодні організатором аукціонів є ТОВ «Українська енергетична біржа», яка пройшла відповідно процедуру відбору. Однак, згідно із Законом України від 14.07.2021 р. № 1639-IX) були внесені зміни до Закону України «Про ринок електричної енергії», якими право на організацію та проведення поза процедурою конкурсу надано АТ «Оператор ринку».

Так, згідно внесених змін, було змінено визначення терміну «оператор ринку» - юридична особа, що забезпечує функціонування ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку та організацію купівлі-продажу електричної енергії на цих ринках, а також має право організовувати та проводити електронні аукціони з купівлі-продажу електричної енергії за двосторонніми договорами на підставі відповідних ліцензій, що видаються Національною комісією з цінних паперів та фондового ринку (п. 54 частини першої статті 1 Закону). Також частину третю статті 51 було доповнено пунктом 4-1, згідно якого Оператор ринку має право організовувати та проводити електронні аукціони з купівлі-продажу електричної енергії за двосторонніми договорами на підставі відповідних ліцензій, що видаються Національною комісією з цінних паперів та фондового ринку.

Такі норми є дискримінаційними по відношенню до інших суб'єктів, які мають намір надавати послуги з організації торгівлі електричною енергією, як за двосторонніми договорами, так і на інших сегментах ринку електричної енергії.

1.2.Аналіз мережі постійного струму фотоелектричної станції

Автономна сонячна електростанція постійного струму

Відповідно до принципу роботи цієї СЕ сонячна енергія, що потрапляє на сонячні панелі (СП), перетворюється в постійний електричний струм. СП з'єднані з контролерами заряду АКБ. Вдень, коли сонце є активним, згенерована електроенергія накопичується в акумуляторних батареях. І вже надалі вона може використовуватися для живлення споживачів постійного струму [3].

Схема СЕ автономного типу постійного струму подана на рис. 1, де контролер заряду

– це електронний пристрій із вбудованим конвертором постійного струму DC/DC, що оптимізує параметри енергії між сонячними панелями і АКБ.

На цей час великою популярністю користуються 2 види контролерів заряду, а саме:

ШІМ і MPPT. Принцип роботи ШІМ контролера заряду СП ґрунтується на досягненні постійної напруги на акумуляторі. ШІМ контролери (PWM-типу) забезпечують заряд АКБ. Як ємнісні накопичувачі пропонується використовувати свинцево-кислотні герметизовані батареї.

Робота MPPT контролера заряду базується на пошуку точки максимальної потужності.

Тобто це пошук значення напруги і сили струму, за яких параметри яскравості світла, нагрівання СП і кута падіння променів сонця будуть максимально ефективними. MPPT контролери заряду можуть заряджати ємнісні свинцево-кислотні, свинцево-сурм'янисті, нікель-кадмієві або літій-залізо-фосфатні накопичувачі енергії більш високого класу [3].



Рис. 1. Схема СЕ автономного типу постійного струму

Ці сонячні електростанції будуть ефективними у тих випадках, коли потрібно організувати автономне вуличне освітлення або забезпечити електроживленням будь-якого іншого споживача постійного струму – охоронні системи, оперативні кола постійного струму, телекомунікаційні установки (радіозв'язок, супутниковий зв'язок, Інтернет тощо) [3].

Технічні характеристики:

- ефективність роботи – 97–98 %;
- складові: СП, контролер заряду, АКБ;
- робота за «зеленим» тарифом не можлива.

1.3. Особливості приєднання фотоелектричної станції до мережі змінного струму

Автономна сонячна електростанція змінного струму

Відповідно до принципу роботи цієї СЕ сонячна енергія перетворюється в постійний електричний струм (за допомогою СП), який подається до контролера заряду. Контролер заряду автоматично встановлює оптимальні налаштування постійного струму для заряду АКБ. Коли АКБ повністю заряджені, то зайва електроенергія подається до мережевого інвертора напруги (DC/AC), підключеного до споживачів змінного струму.

У години, коли сонця немає або сонячної енергії недостатньо для

генерації електрики (ввечері, вночі та зранку), електроенергія з АКБ подається до інвертора, де перетворюється у змінну і потім вже живить споживачів змінного струму. Функції інверторів дозволяють здійснювати гнучке налаштування схеми роботи СЕ.

Схема СЕ автономного типу змінного струму подана на рис. 2. Розглянемо основні режими роботи СЕ автономного типу змінного струму.

Режим 1. Автономне електропостачання. Дана схема може застосовуватися, коли немає мережі змінного струму. Вся накопичена за світловий день електроенергія в АКБ використовується у вечірній та нічний час для живлення споживачів змінного струму. Правильний розрахунок потужності сонячних панелей і достатня енергоємність АКБ дозволяють забезпечити повну автономність об'єкта.

Режим 2. Змішане електропостачання. Цей вид СЕ вимагає наявності мережі змінного струму, яка використовується при розряді АКБ, щоб не відбувалося припинення подачі електропостачання споживачів. Перевага цього типу полягає в тому, що немає необхідності встановлювати багато СП та АКБ, бо завжди є можливість отримати нестачу електроенергії від централізованої мережі.



Рис. 2. Схема СЕ автономного типу змінного струму

Режим 3. Резервне електропостачання. У цьому випадку схема СЕ передбачає налаштування інвертора таким чином, що АКБ залишається

завжди зарядженою на 100 %. Лише невелика кількість виробленої сонячної електроенергії витрачається на підтримку повного заряду акумуляторів, решта об'єму перетворюється на змінний струм і використовується для живлення споживачів, надлишок віддається в мережу, згідно з умовами

«зеленого» тарифу.

Технічні характеристики:

- ефективність роботи до 90–93 %;
- складові: СП, контролер заряду, АКБ; мережевий інвертор;
- можлива робота в умовах «зеленого» тарифу.

Мережева сонячна електростанція змінного струму

Відповідно до принципу роботи цієї СЕ постійний струм, що виробляється СП, подається на вхід мережевого інвертора, який перетворює постійний струм на змінний. Вихід від мережевого інвертора підключено до мережі змінного струму, а також до споживачів електроенергії. Вказана схема відрізняється своєю простотою, однак конструкція має кілька особливостей. СЕ працює тільки тоді, коли доступна електрична мережа змінного струму, а також напруга в мережі перебуває в робочому діапазоні інвертора.

Схема мережевої СЕ змінного струму подана на рис. 3.

У денний час, коли споживання електроенергії, як правило, знаходиться на мінімальному рівні, вироблена енергія передається в мережу за «зеленим» тарифом. У вечірній та нічний час енергія надходить з мережі. Таким чином, вказаний вид СЕ дозволяє істотно економити на витратах за оплату електроенергії, а якщо збільшити масив СП, то домогосподарство буде отримувати прибуток за позитивну різницю виробленої й витраченої електроенергії за підсумками певного терміну.

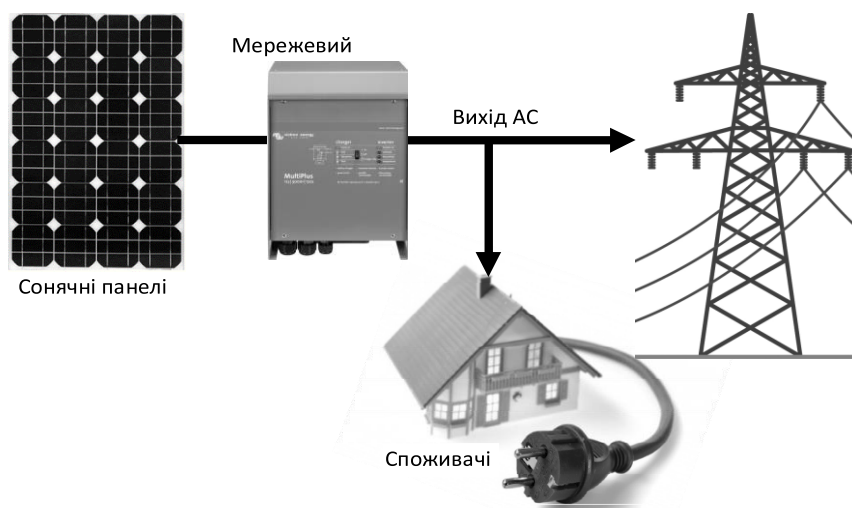


Рис. 3. Схема мережевої СЕ змінного струму

Технічні характеристики:

- ефективність роботи – до 97 %;
- складові: СП, мережевий інвертор;
- можлива робота в умовах «зеленого» тарифу.

Гібридна сонячна електростанція змінного струму

Відповідно до принципу роботи цієї СЕ постійний струм, що виробляється СП, подається на вхід мережевого інвертора, який перетворює постійний струм на змінний. Вихід від мережевого інвертора підключено до мережі змінного струму через розподільчий щит, а також до споживачів електроенергії. Мережа змінного струму підключається до входу гібридного інвертора; також до гібридного інвертора підключено АКБ. Виходи мережевого сонячного інвертора і гібридного інвертора об'єднані через розподільний щит і забезпечують електроживленням споживачів змінного струму.

Застосування гібридного інвертора із зарядним пристроєм у цьому типі СЕ забезпечує ряд переваг – електростанція працює навіть за відсутності напруги в мережі змінного струму, а також в умовах нестабільної мережі. Доступно кілька режимів роботи, які можуть гнучко налаштуватися

відповідно до потреб та залежно від пори року.

Схему гібридної СЕ змінного струму подано на рис. 4.

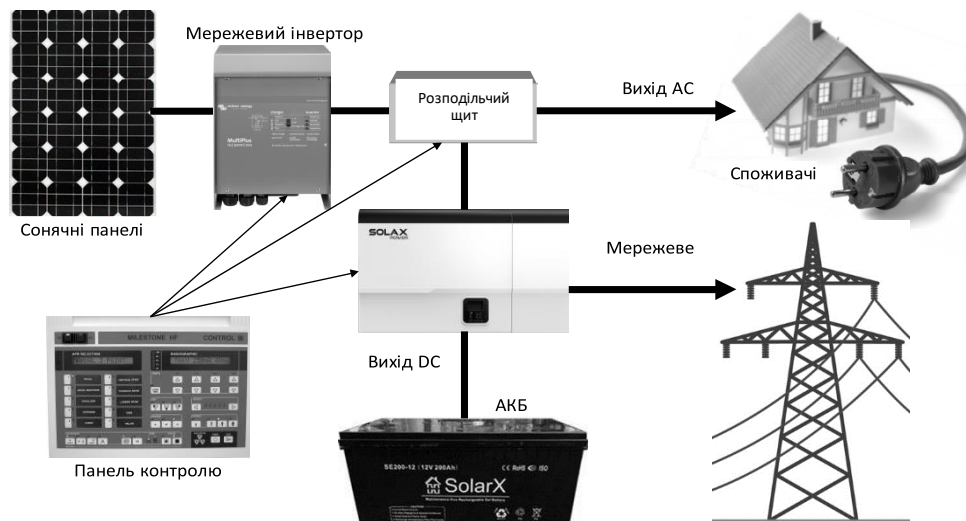


Рис. 4. Схема гібридної СЕ змінного струму

Розглянемо основні режими роботи гібридної СЕ змінного струму.

Режим 1. Автономна електростанція. Згенерована електроенергія накопичується в АКБ. Мережевий інвертор подає змінну напругу на вихід гібридного інвертора, який здійснює заряд АКБ. Надлишок електроенергії використовується споживачами або віддається в мережу змінного струму за умовами «зеленого» тарифу. У вечірній та нічний час електроживлення забезпечується гібридним інвертором від акумуляторів.

Для автономного електропостачання потрібно встановлювати СП відповідної потужності, щоб згенерованої електроенергії вистачало на достатній заряд АКБ, а їх ємності було достатньо, щоб покрити потреби споживачів.

Режим 2. Змішане електропостачання. У цьому випадку допускається незначний або повний розряд АКБ (задається на панелі контролю), після чого електроживлення буде переключене на мережу змінного струму. Мережевий інвертор продовжує роботу в будь-якому випадку і доповнює потужність

системи, а також продовжує заряджати АКБ. Надлишок електроенергії передається в мережу за умовами «зеленого» тарифу.

Режим 3. Резервне електропостачання. Схеманалаштована таким чином, що АКБ задіяні тільки за відсутності живлення від централізованої електричної мережі (аварія, планове або віялові відключення тощо). Сонячний інвертор виробляє електроенергію й забезпечує нею споживачів. Надлишок енергії передається в мережу за умовами «зеленого» тарифу. Подібні СЕ застосовуються для місць, де потрібно створити систему гарантованого електроживлення, а також знизити залежність або повністю відмовитися від загальної мережі електропостачання, наприклад, для будинків, котеджів, офісів, готелів, баз відпочинку тощо.

Технічні характеристики:

- ефективність роботи – до 97 %;
- складові: СП, мережевий інвертор, гібридний інвертор, розподільчий щит, панель контролю, АКБ;
- можлива робота в умовах «зеленого» тарифу.
- Сонячні зарядні станції для електромобілів

Виходячи з проведеного аналізу конструкцій, типів і будови СЕ та відповідно до поставленого завдання, за основу для сонячної зарядної станції для електромобілів обрано гібридну СЕ змінного струму.

Схему реалізації сонячної зарядної станції для електромобілів подано на рис. 5. Принцип роботи цієї схеми співпадає з принципом роботи схеми, поданої на рис. 4. Відмінність цих двох схем полягає лише в тому, що споживачами виступають зарядні системи електромобілів через відповідний порт зарядного пристрою.

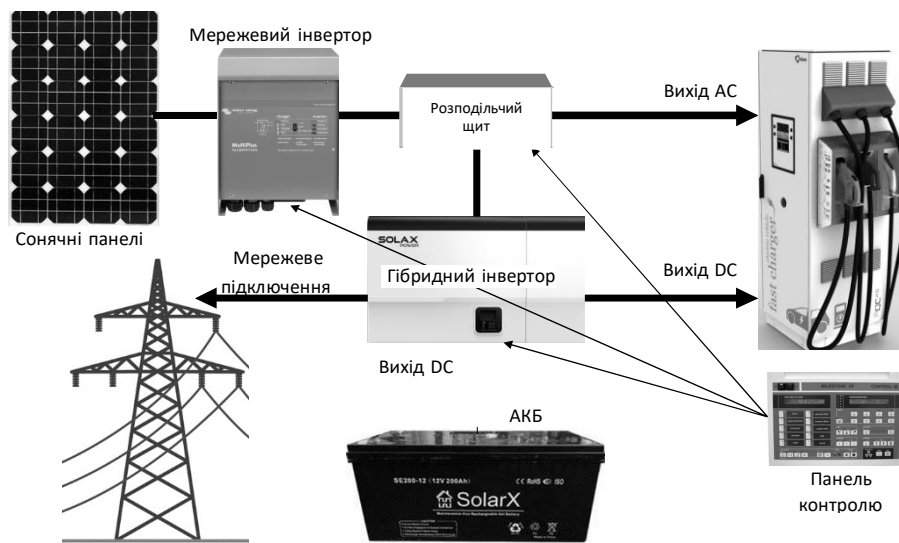


Рис. 5. Схема сонячної зарядної станції для електромобілів

Якщо заряд йде постійним струмом, то електрична енергія надходить з гібридного інвертора через мережу постійного струму. Якщо заряд електромобіля здійснюється змінним струмом, то система заряду підключається до мережі змінного струму. Електроенергія в цьому випадку надходить або від гібридного інвертора, або від мережевого інвертора через розподільчий щит. Потік електроенергії визначається програмним чином (панель контролю) залежно від наявних умов та стану заряду АКБ сонячної зарядної станції. При цьому якщо АКБ сонячної зарядної станції будуть повністю заряджені, передбачається робота станції за «зеленим» тарифом з відданням надлишків енергії в загальну мережу через гібридний інвертор.

Технічні характеристики:

- ефективність роботи – до 97 %;
- складові: СП, мережевий інвертор, гібридний інвертор, розподільчий щит, панель контролю, АКБ, зарядна станція з роботою від постійного та змінного струму;
- можлива робота в умовах «зеленого» тарифу.

Подібні зарядні електростанції знижують залежність від загальної електромережі електропостачання або дозволяють повністю відмовитися від неї. Як АКБ у запропонованій зарядній станції планується використовувати вживані АКБ від електромобілів. У подальших роботах буде подано більш детальний аналіз сонячних зарядних станцій для електромобілів з розрахунком їх основних складових та аналізом

енергетичних і електричних процесів, що протікають.

1.4. Аналіз та характерні режими роботи сонячної енергетики в Україні

Загальна площа сонячних колекторів в Україні в 2008 р. склала біля 45 тис. м². У кліматичних умовах України ефективним є використання сонячних колекторів для децентралізованого теплопостачання, нагрівання повітря, висушування зерна тощо. В Україні існують достатньо сприятливі умови для використання сонячної енергії. Річний технічно досяжний енергетичний потенціал сонячної енергії в Україні еквівалентний 6 млн. т у. п., його використання дозволило б замінити біля 5 млрд. м³ природного газу.

Середньорічна кількість сумарної сонячної радіації, що потрапляє на 1 м² поверхні, на території України знаходиться в межах від 1070 кВт·год/м² в її північній частині до 1400 кВт·год/м² і вище на півдні України.

В 2008 році в Україні почався розвиток сонячної енергетики, що обумовлено введенням «зеленого» тарифу на законодавчому рівні. Перша СЕС в Україні була введена в експлуатацію у 2010 році в Криму («Родникове» встановлена потужність котрої становить 2,5МВт). В 2012 році почали збільшуватись кількість іноземних інвестицій в енергетичну галузь України. Відповідно до статистичних даних держенергоефективності приріст потужностей сонячних електростанцій у 2015 році становив 30 МВт, а потім щороку збільшується у 2016 році 121 МВт потужностей, у 2017 році 257 МВт. Також слід відзначити, що 2015 та 2014 роки стали кризовими для сонячної енергетики, оскільки значна кількість встановлених потужностей була зосереджена в Криму та в районах Донбасу, також країна втратила інвестиційну привабливість.

Але незважаючи на складне економічне і політичне становище, країна починає поступово нарощувати потужності відновлювальних джерел енергії.

Так у 2015 році в Україні були введені в експлуатацію три великі сонячні електричні станції, а саме у Львові була завершена друга черга будівництва сонячної електричної станції «Самбор-2» збільшивши свої потужності з 1МВт до 5 МВт. В населеному пункті Цекіновка Вінницької області завершили будівництво СЕС загальною потужністю 2,4 МВт. Також значні потужності наростила компанія Rengy

Development завершивши будівництво 30 МВт сонячної електричної станції. Загальна потужність встановлених СЕС на території України на 2015 рік становила 0,36 ГВт, що на 0,01 ГВт більше аніж в минулому році.

На початок 2016 році на території України встановлені 112 генеруючих фотоелектричних джерел потужність яких сягає 838,83 МВт, даними СЕС за 2015 рік вироблено 475,1 млн. кВт·год електроенергії. Якщо брати до уваги домашні домогосподарства то на початок 2016 року даними установками загальною потужністю 2,6 МВт, відпущено 0,41 млн. кВт·год, що в порівнянні з 2014 роком, є більшим в одинадцять разів. Поштовхом такого різкого збільшення змонтованих сонячних панелей приватними домогосподарствами став встановлений сприятливий зелений тариф.

В 2016 році відбувся запуск першої трекерної станції в місті Підгородне Дніпропетровської області встановленою потужністю 2,56 МВт, а загальна потужність станції (включаючи статичні системи) становить 4,21 МВт. У 2016 році українці значно збільшили кількість сонячних панелей на приватних будинках, їх кількість збільшилась до 1109 одиниць, а встановлена потужність збільшилась до 16,7 МВт. Підіб'ємо підсумки, загальна потужність сонячних електричних станцій у 2016 році на території України становила 0,46 ГВт.

Аналізуючи 2017 рік сонячна енергетика значно збільшила свої потужності, цьому сприяє відносно низькі капіталовкладення в порівнянні з іншими відновлювальними джерелами. З початку 2017 року домашні домогосподарства збільшили свої потужності до 37,1 МВт, в кількісному еквіваленті це становить 1214 сонячної панелі, тобто українці встановлюють панелі з більшою номінальною потужністю. Цього року відбувся запуск СЕС в Херсонській області потужністю 10 МВт, потужні проекти були реалізовані в Одеській області, потужність яких становить 241 МВт. Також значний приріст відновлювальних джерел, котрі використовують енергію сонця, відбувся в Херсонській області – потужність збільшилась до 98 МВт, у Вінницькій області – 128 МВт.

Географічне розташування України сприятливо для реалізації проектів генерації сонячної енергії. Для клімату України характерна велика кількість сонячних днів: за ступенем інсоляції Україна значно перевершує визнаного європейського лідера в

сонячної енергетиці - Німеччину. Це є базовим фактором, що дозволяє говорити про комерційні перспективи проектів сонячної електрогенерації, що реалізуються в Україні. Держава також декларує всебічну підтримку проектам генерації енергії на основі ВДЕ. Однак на практиці реалізація таких проектів вимагає врахування низки нюансів, без чого ініціатор проекту може зіткнутися з серйозними обмеженнями і ризиком не досягти цільових показників. За 3 місяці 2018 року введено в експлуатацію 159,4 МВт генеруючих потужностей, що в 2,4 рази перевищує потужність введена в експлуатацію за аналогічний період 2017 року. Динаміка введення в експлуатацію нових потужностей з ВДЕ за I квартал 2018 року зображено на рисунку 1.1.

Динаміка введення в експлуатацію нових потужностей, МВт

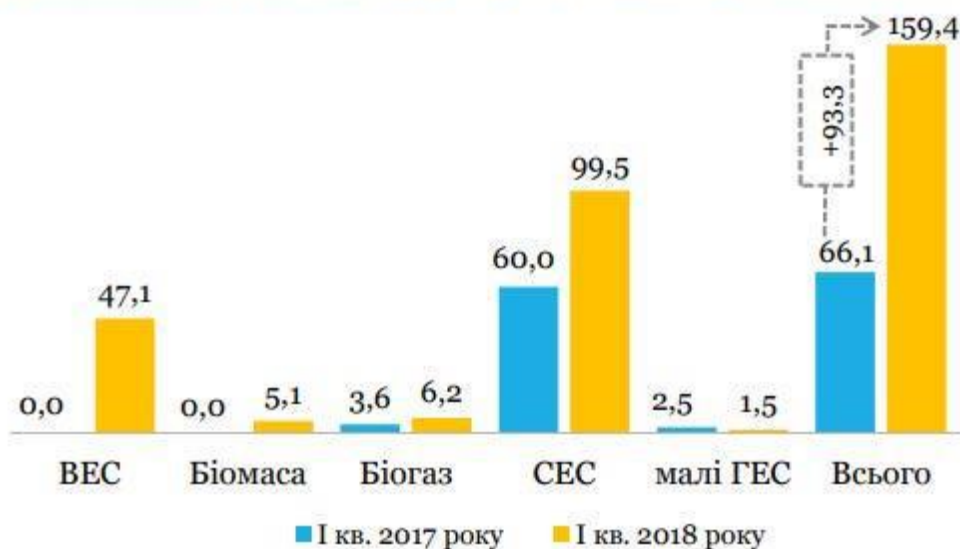


Рисунок 1.1 – Динаміка введення в експлуатацію нових потужностей ВДЕ, МВт.

Встановлена потужність об'єктів відновлювальних джерел енергії по регіонам за I квартал 2018 року зображена на рисунку 1.2. Лідером із введенням в експлуатацію об'єктів ВДЕ за I квартал 2018 року є Херсонська область.

Потужність введена у 1 кварталі 2018, МВт



Рисунок 1.2 – Встановлена потужність об'єктів ВДЕ по регіонам за I квартал 2018 року, МВт.

Загальна встановлена потужність об'єктів відновлювальних джерел енергії в Україні зображена на рисунку 1.3.

Загальна встановлена потужність, МВт

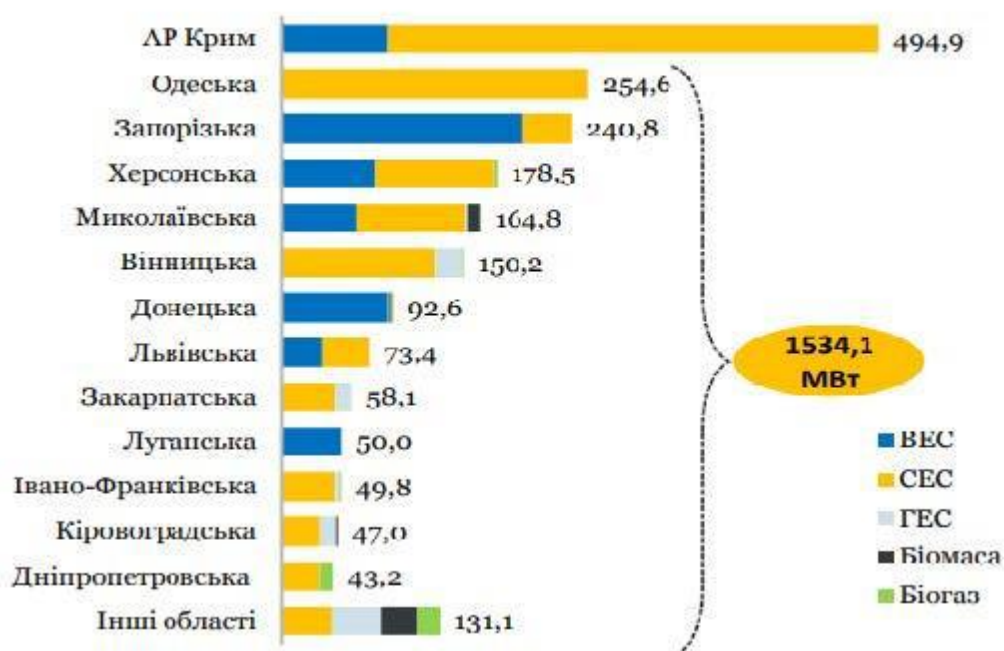


Рисунок 1.3 – Загальна встановлена потужність об'єктів ВДЕ в Україні, МВт.

Ініціатори проектів будівництва СЕС розраховують на те, що уряд неухильно дотримуватиметься реалізації «Енергетичної стратегії України до 2035 року», згідно з якою частка енергетики відновлюваних джерел до 2020 повинна досягти 11% у валовому кінцевому споживанні, а до 2035 року - 20%. А отже, - не скасують дію

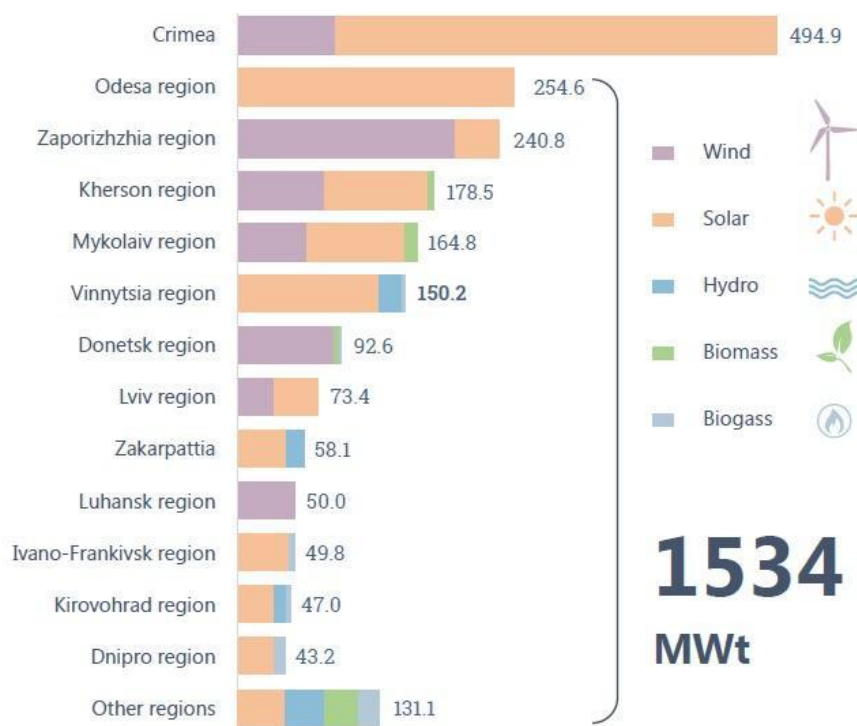
«зеленого» тарифу. В контексті конкурентного потенціалу проектів СЕС слід згадати їх значну мобільність. На відміну від генераторів енергії з традиційних джерел, які жорстко прив'язані до існуючої майданчику, сонячна електростанція порівняно швидко демонтується і може бути заново змонтована в іншому місці за умови наявності відповідної інфраструктури.

Україна робить важливі кроки для розширення використання ВДЕ та альтернативних видів палива в межах своєї більш широкої стратегії щодо зниження залежності від традиційних викопних видів палива. Підраховано, що наша країна має потенціал, щоб до 2030 року удесятеро збільшити використання відновлюваної енергії та на 15% скоротити споживання природного газу.

Варто зазначити, що клімат та географічне положення України сприятливі для розвитку сонячної енергетики і будівництва СЕС. Навіть північні області країни мають значний потенціал для розвитку даної галузі, який не поступається більшості європейських регіонів.

Наразі розвиток сонячної енергетики в Україні знаходиться на стадії, яку Європа пройшла 7-10 років тому. У той же час ми маємо одну з найпривабливіших інвестиційних структур в Європі для розвитку галузі. Дійсно, тут були створені сприятливі умови: наявність ресурсів і земельних ділянок, пільговий тариф, державна підтримка і цільова енергетична стратегія, мета якої – досягти 25% виробництва чистої енергії до 2035 року. В результаті інтерес до відновлюваної енергетики в Україні продовжує зростати, і, за оцінками уряду, до 2020 року загальний обсяг інвестицій в альтернативну енергетику досягне 18 мільярдів доларів США.

І хоча сектор ВДЕ все ще малий порівняно з іншими типами генерації в Україні, в той же час демонструє постійне зростання, роблячи нашу країну лідером даної галузі. З 2014-го і до кінця 2017 року обсяг ВДЕ збільшився з 967 до 1375 МВт, і до кінця 1-го кварталу 2018 року – до 1534 МВт (рисунок 1.4).



Рисунк 1.4 – Виробництво ВДЕ по регіонах станом на I квартал 2018 року.

Згідно з прогнозами, до 2020 року потужність встановлених об'єктів сонячної енергії в Україні збільшиться до 3 ГВт. Станом на 1 квітня 2019 року, в країні встановлено понад 2,2 ГВт об'єктів сонячної енергетики, а це 71% усіх існуючих ВДЕ. Такий швидкий та активний розвиток галузі дозволив Україні піднятися з 34-го на 23-е місце в світовому рейтингу сонячної енергетики.

У майбутньому для розширення перспектив сонячної енергетики Україна може перейняти вдалий досвід наших іноземних колег.

Транспортні можливості. Всі знають та навіть бачили на дорогах мегаполісів нашої країни чимало сучасних електромобілів, але мало хто знає, що в європейських країнах фотоелементи розміщуються на дахах потягів і забезпечують їх електроенергією під час роботи. У перспективі цю технологію можна застосовувати і на водних та повітряних судах.

Термальна енергетика – спосіб перетворення енергії сонця за допомогою нагрівання води в ємностях із матеріалів, які добре проводять тепло.

Загалом, сонячна енергетика буде нарощувати потужності в Україні, тому що:

- є зацікавленість зарубіжних інвесторів;
- у країні багато регіонів, де обладнання для СЕС працює максимально ефективно;
- після разового вкладення коштів гарантовано тривале отримання прибутку.

1.5. Аналіз принципу роботи та типу сонячних панелей

Сонячна батарея - побутовий термін, що використовується в розмовній мові або ненауковою пресою. Зазвичай під терміном «сонячна батарея» або «сонячна панель» мається на увазі кілька об'єднаних фотоелектричних перетворювачів (фотоелементів) - напівпровідникових пристроїв, прямо перетворюючих сонячну енергію в постійний електричний струм.

На відміну від сонячних колекторів, які виробляють нагрівання матеріалу-теплоносія, сонячна батарея виробляє безпосередньо електрику. Однак для виробництва електрики з сонячної енергії використовуються і сонячні колектори: зібрану теплову енергію можна використовувати і для вироблення електрики. Великі сонячні установки, що використовують висококонцентроване сонячне випромінювання в якості енергії для приведення в дію теплових і ін. машин (парової, газотурбінної, термоелектричної та ін), називаються геліоелектростанції.

Різні пристрої, що дозволяють перетворювати сонячне випромінювання в теплову та електричну енергію, є об'єктом дослідження геліоенергетики (від геліос грец. Ἥλιος, Helios – сонце). Виробництво фотоелектричних елементів і сонячних колекторів розвивається швидкими темпами в самих різних напрямках. Сонячні батареї бувають різного розміру: від вбудовуваних в мікрокалькулятори до обіймають даху автомобілів і будинків.

Популярність сонячних батарей серед власників замиської нерухомості спровокувала надзвичайний інтерес користувачів до того питання, а яким же чином функціонує цей пристрій і за рахунок чого воно дозволяє домогтися високої ефективності.

Перетворення енергії в Фотоелектричних панелях ґрунтується на фотовольтаїчному ефекті. Він утворюється в напівпровідникових неоднорідних структурах у результаті впливу на них випромінювання Сонця. Що стосується природи представленого явища, то вона в першу чергу полягає в тому, що неоднорідність сонячних батарей досягається за рахунок легування одного напівпровідника різноманітними домішками (це процес відомий як «отримання р - п-переходів») або за рахунок об'єднання різноманітних напівпровідників із забороненою

ділянкою енергії, де спостерігається обрив електрона. Слід зауважити, що можливі також всілякі комбінації предоставлених методів.

Ефективність процесу перетворення залежить виключно від електрофізичних параметрів напівпровідникової неоднорідної структури і, звичайно ж, оптичних якостей Фотоелектричні панелі. У цьому питанні окремої уваги заслуговує фотопровідність, певна процедурами внутрішнього фотоефекту, що спостерігається в напівпровідниках в результаті їх опромінення світлом Сонця.

Існують два способи перетворення сонячної енергії: фототермічний і фотоелектричний. У першому, теплоносій нагрівається в сонячному колекторі до високої температури і використовується для гарячого водопостачання або опалення приміщень. У другому, пряме перетворення сонячного випромінювання в електричний струм за допомогою напівпровідникових фотоелементів - сонячних батарей.

Сонячні батареї будуються з модулів, зроблених на основі кристалів кремнію. Залежно від галузі застосування, сонячні модулі можуть мати різні конструктивні рішення і різні вихідні потужності. Застосовуються сонячні батареї для забезпечення автономною електроенергією.

Сонячні батареї класифікуються по організації атомів кремнію в кристалі сонячного елемента: монокристалічні, полікристалічні і аморфні.

Монокристалічні батареї забезпечені вкрай чистим кремнієм, який досить добре освоєний у виробництві напівпровідників. Монокристал зростає на насінні, що витягається з кремнієвого розплаву. Отримані таким шляхом стрижні розрізають на частини товщиною 0,2 - 0,4 мм, утворюючи чарунки. Оптимальна кількість використовуваних осередків - 36 штук. Батареї, отримані з монокристалів кремнію, користуються найбільшою популярністю.

ККД монокристалічних батарей - 14-17%.

Полікристалічні сонячні батареї роблять з кремнію, який виходить з повільно охолоджуваного кремнієвого розплаву. Такий спосіб менш енергоємний і дешевший. Кремній, отримуваний для полікристалічних сонячних батарей, яскраво синього кольору.

ККД полікристалічних батарей - 10-12%.

Батареї з аморфного кремнію виходять шляхом «техніки випарної фази». Тонка плівка кремнію при цьому методі просто осідає на несучий матеріал і захищається покриттям, тому такі батареї також називаються тонкоплівковими. Цей метод виготовлення найпростіший і дешевий, проте ефективність батареї значно нижче, ніж в кристалічних батареях, до того ж елементи з аморфного кремнію схильні до процесу деградації. Працюють тонкоплівкові батареї при розсіяному випромінюванні, встановлюються на стіни будівель.

1.6. Падаюче випромінювання на поверхню Землі

Земля обертається навколо Сонця по еліптичній орбіті з Сонцем в якості одного з фокусів. Площина цієї орбіти називається екліптикою. Час, необхідний Землі для завершення цієї орбіти, визначається в рік. Відносне положення Сонця і Землі зручно представити за допомогою небесної сфери навколо Землі.

Екваторіальна площину перетинає небесну сферу у небесному екваторі і полярну вісь в небесних полюсах. Рух Землі навколо Сонця потім зображується видимим рухом Сонця в еліптичному, який нахилений в 23.45° щодо небесного екватора. Кут між лінією, що з'єднує центри Сонця і Землі, і її проекцією на екваторіальну площину називається кутом схилення Сонця (d). Цей кут дорівнює нулю в позиціях весни (20/21 березня) і осені (22/23 вересня).

Земля сама обертається зі швидкістю один оборот в день навколо полярної осі. Щоденне обертання Землі зображується обертанням небесної сфери навколо полярної осі, а миттєве положення сонця описується годинним кутом v , кут між меридіаном, що проходить через сонце, і меридіаном майданчика. Часовий кут дорівнює нулю в сонячний полудень і збільшується на схід. Для спостерігачів на земній поверхні на місце розташування з географічною широтою w , зручна координата визначається вертикальною лінією на ділянці, який перетинає небесну сферу у двох точках - зеніті і надирі і становить кут w з полярною віссю (рисунок 1.5). Велике коло, перпендикулярний вертикальній осі, є горизонтом.

Широта (w) точки або місцезнаходження - це кут, створюваний радіальною лінією, що з'єднує місце розташування з центром землі з проекцією лінії на екваторіальну площину. Вісь обертання Землі перетинає земну поверхню на широті 90° (Північний полюс) і на широті -90° (Південний полюс). Будь-яке місце

розташування на поверхні землі може бути визначено перетином кута довготи і кута широти.

Кут висоти Сонця (α) визначається як вертикальний кут між проекцією сонячних променів на горизонтальну площину і напрямком сонячних променів, що проходять через точку, як показано на рисунку 1.5. В якості альтернативи висота сонця може бути описана в термінах сонячний зенітний кут ($0z$), який є вертикальним кутом між сонячними промені і лінія, перпендикулярна горизонтальній площині через точку ($0z = 90 - \alpha$). Сонячний азимутальний кут (γ_s) - це горизонтальний кут, що від півдня (в північній півкулі) до горизонтальної проекції сонячних променів.

Були проведені опитування для визначення взаємозв'язку між цими параметрами і розрахунку сонячних позицій. Уолравен розрахував параметр для визначення положення сонця за допомогою програми FORTRAN. Розраховані параметри були: час, довгота сонця, схилання, місцевий азимут, висота, схід і захід в реальному часі. Було згадано, що обчислене положення сонця знаходилося з точністю до 0,018.

1.6. Випромінювання на похилих та відстежуючих поверхнях

Дані про сонячному випромінюванні зазвичай даються в формі глобального випромінювання на горизонтальній поверхні, а фотоелектричні панелі зазвичай розташовані під кутом до горизонтальної площини; отже, підведення енергії до фотоелектричної системі повинен бути розрахований відповідним чином. Розрахунок відбувається в три етапи. На першому етапі дані для сайту використовуються для визначення дифузного і променевого компонентів глобального опромінення в горизонтальній площині. Це здійснюється з використанням позаземного добового опромінення, B_0 як еталон і розрахунку відносини $K_t = G / B_0$, відомого як індекс чіткості, де

G - щоденне глобальне опромінення на горизонтальній площині (зазвичай середньомісячне значення), а K_t описує середнє ослаблення сонячної радіації атмосферою в даному місці протягом даного місяця.

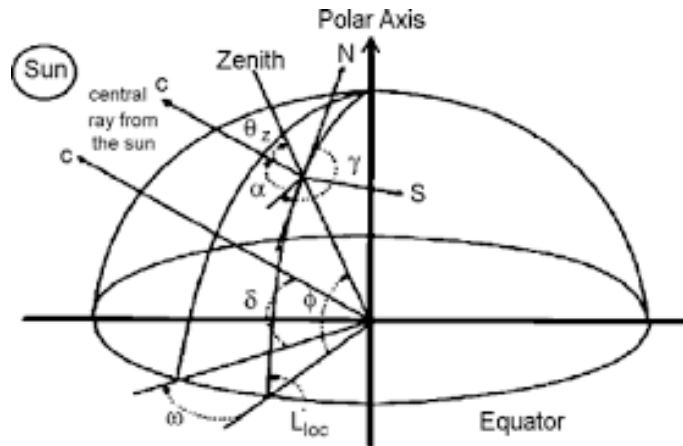


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення сонячних кутів.

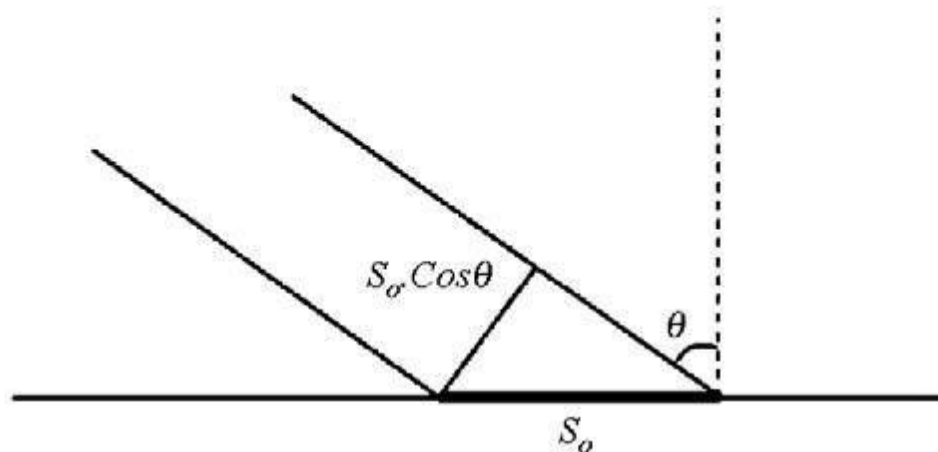


Рисунок 1.6 – Кут падіння сонячного випромінювання.

На другому етапі дифузне опромінення отримують з використанням емпіричного правила про те, що дифузна частка D / G глобального випромінювання є універсальною функцією індексу чіткості K_t (D - середньомісячне середньодобове дифузне опромінення на горизонтальній площині в $\text{Вт} / \text{м}^2$). Оскільки $B = G - D$, ця процедура визначає як розсіяне, так і променеве опромінення в горизонтальній площині (B - денний промінь опромінення в горизонтальній площині).

На третьому етапі відповідна кутова залежність кожного компонента використовується для визначення дифузного і променевого опромінення на похилій поверхні. З урахуванням відбивної здатності навколишнього області також може бути визначено альбедо. Загальна добова опромінення на похилій поверхні потім виходить шляхом додавання трьох компонентів.

Сонце рухається по небу вдень. У разі нерухомих сонячних колекторів проекція площі колектора на площину, перпендикулярна напрямку випромінювання, визначається функцією косинуса кута падіння (рисунок 1.6).

Чим вище кут падіння α , тим менше потужність. Теоретичний розрахунок витягнутої енергії в разі використання стежать колекторів здійснюється виходячи з припущення, що максимальна інтенсивність випромінювання $I = 1000 \text{ Вт} \times \text{м}^2$ падає на область, орієнтовану перпендикулярно напрямку випромінювання. Якщо взяти тривалість дня $t = 12 \text{ год} = 43\,200 \text{ с}$, то інтенсивність стежиння колектора, який завжди оптимально орієнтований щодо сонця, порівнюється з інтенсивністю фіксованого колектора, який орієнтований перпендикулярно напрямку випромінювання тільки в полудень. Область колектора позначена як S_0 .

Для фіксованого колектора площа проекції в області, орієнтованої перпендикулярно напрямку випромінювання, дорівнює $S = S_0 \times \cos\theta$, де θ змінюється в інтервалі $(-\pi/2, +\pi/2)$ протягом дня. Кутова швидкість сонця, що рухається по небу, дорівнює

$$\omega = 2\pi/T = 7.27 \times 10^{-5} \text{ рад/с.}; \quad (1.1)$$

а диференціал падаючої енергії дорівнює:

$$dW = IS \, dt. \quad (1.2)$$

Нехтуючи впливом атмосфери, енергія на одиницю площі розраховується на весь день:

$$3.03 \times 10^7 \text{ Вт} \times \text{с}/\text{м}^2 \text{ на добу} = 8,41 \text{ кВт} \times \text{год}/\text{м}^2 \text{ на добу}. \quad (1.3)$$

Для відстежуючого колектора, нехтуючи впливом атмосфери, енергія на одиницю площі протягом усього дня:

$$W = I \times S_0 \times t = 4,75 \times 10^7 \text{ Вт} \times \text{с} = 13,2 \text{ кВт} \times \text{год}/\text{м}^2 \text{ в день}$$

Наведені вище розрахунки показують, що система стежиння виробляє на 57% більше енергії ніж статична. Ця кількість енергії може бути отримана, наприклад, на поверхні Місяця. Сонячні промені, що досягають земної поверхні, проходять через товстий шар атмосфери. При врахуванні впливу атмосфери, інсоляція на поверхні Землі виявиться менше.

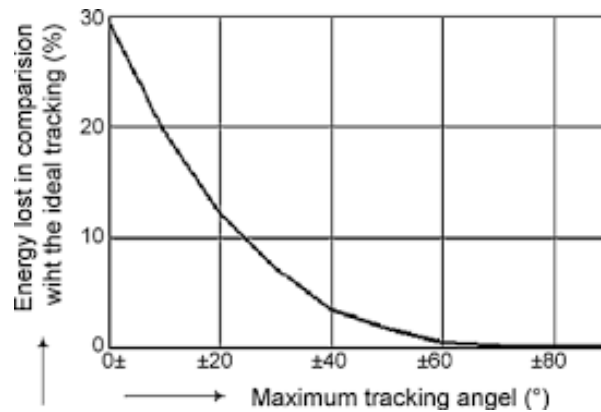


Рисунок 1.7 – Енергія втрачається в залежності від максимального кута відстеження в порівнянні з ідеальним відстеженням.

Також в розрахунках можна розглянути тривалість дня більше 12 годин. На рисунку 1.7 показана залежність втрати енергії від максимального кута відстеження в порівнянні з оптимальним кутом. На малюнку видно, що при кутах стеження не менше $\pm 60^\circ$ істотне посилення енергії ніхто не відчує.

1.7. Збільшення енергії в системах стеження

Стеження за сонцем може бути реалізоване з використанням одноосьової і, для більш високої точності, двохосьової системами стеження. Для двохосьової системи стеження за сонцем потрібні дві координати позиціонування : полярне (екваторіальне) стеження і азимутне (підвищення). Сонячний трекер - цей пристрій, який підтримує фотоелектричні панелі в оптимальному положенні, - перпендикулярно сонячним променям в денний час, і збільшує кількість зібраної енергії. Перший трекер, представлений К. Финстером в 1962 році, був повністю механічним. Через рік Сааведра представила механізм з автоматичним електронним управлінням, який використовувався для орієнтації піргеліометра Eppley.

Трекери не повинні вказувати прямо на сонце, щоб бути ефективними. Якщо сонячна панель відключена на 10° , видавана потужність залишається на рівні 98,5% від максимальної можливої при ідеальному позиціонуванні. У дуже хмарних і туманних місцях збільшення в річному об'ємі від трекерів може бути нижче 20%. У загальному випадку, річний приріст складає від 30 до 40%. Коефіцієнт посилення у випадковий день може варіюватися від майже нуля до майже 100%.

Т. Томсон проаналізував ефективність двохосьового одиничного автономного плоского концентратора. Порівняння результатів моделювання і експерименту показало, що використання простого трекінгу з низькою споживаною енергією для

короткого щоденного руху збільшило вироблення енергії за сезон на 10-20% в порівнянні з колектором, встановленим під оптимальним кутом.

Група дослідників на чолі з Джоном Аджи вивчали ринкові тенденції і прикладне застосування технологій стеження за Сонцем, пов'язані з ними витрати, вимоги до обслуговування і підвищення ефективності таких систем. Їх дослідження розглядали гідравлічні системи, керовані програмно, ґрунтовані на датчиках, такі як одноосьові, двохосьові, а також трекери з полярною віссю. Вони дійшли висновку, що гідравлічна система стеження підходить для установок з малою потужністю. Вони виявили, що характеристики системи відстежування полярних осей були аналогічні характеристикам двохосьового типу, а його вартість дорівнювала вартості одноосьової системи стеження.

Н. Хельва з групою дослідників порівняли стаціонарні і стежачі фотоелектричні системи для оцінки енергоспоживання систем стеження і впливу точності стеження на вироблення енергії. Порівнянними системами були: фіксована система з кутом нахилу 40° , вертикально-осьова система стеження (з використанням часу, дати і параметрів ділянки для управління), і двохосьовий трекер (керований мікропроцесором, що приймає команди з ПК). Використовувалися декілька датчиків числа оборотів і кінцевих вимикачів. Криві порівняння між різними системами стеження за сонцем показали, що збільшення річного вироблення енергії за допомогою двохосьового трекера і одноосьового трекера вертикального стеження складало 30 і 18% відповідно.

Споживана потужність, обумовлена мікропроцесорами, електроустаткуванням, датчиками, електричними перемикачами і приводами складала 50 Вт·ч/доб і 22 Вт·ч/добу, при помилці відстежування $\pm 0,56^\circ$ і $\pm 10^\circ$ відповідно.

1.8. Методи відстеження Сонця

Наявність сонячного трекера не є необхідною для роботи сонячних батарей, але з його допомогою можна збільшити продуктивність установки. Попри те, що сонячні трекери можуть збільшити енергетичний приріст ФЕС, при їх установці необхідно враховувати деякі проблеми, такі як вартість, надійність, споживання енергії, технічне обслуговування і продуктивність.

Системи відстежування мають усі або деякі з наступних характеристик:

- один або два рушійні двигуни;
- світлочутливий пристрій;
- автономне або допоміжне енергопостачання;
- дотримання і переміщення відповідно до календаря;
- безперервний або ступінчастий рух;
- відстежування круглий рік або сезонне відстежування.

Було розглянуто декілька методів спостереження за сонцем, які дозволяють утримувати сонячні батареї перпендикулярно сонячним променям. Ідеальний трекер дозволив би фотоелементам точно вказувати на Сонце, компенсуючи обидві зміни: азимутне зміщення Сонця (впродовж дня), широтне зміщення Сонця (під час сезонних змін). Системи стеження за Сонцем зазвичай класифікуються по двох категоріях: пасивні (механічні) і активні (електричні) трекери.

1.8. Висновки до розділу 1

Виходячи з розглянутих результатів досліджень і експериментів можна сказати, що на даний момент розроблене досить велика кількість різноманітних способів стеження. Проте, не було вирішено завдання порівняння систем позиціонування стежачих майданчиків. І питання вибору найбільш раціонального способу управління трекерними системами залишається відкритим.

РОЗДІЛ 2 ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІД СЕС

2.1 Застосування енергії сонця в енергетиці

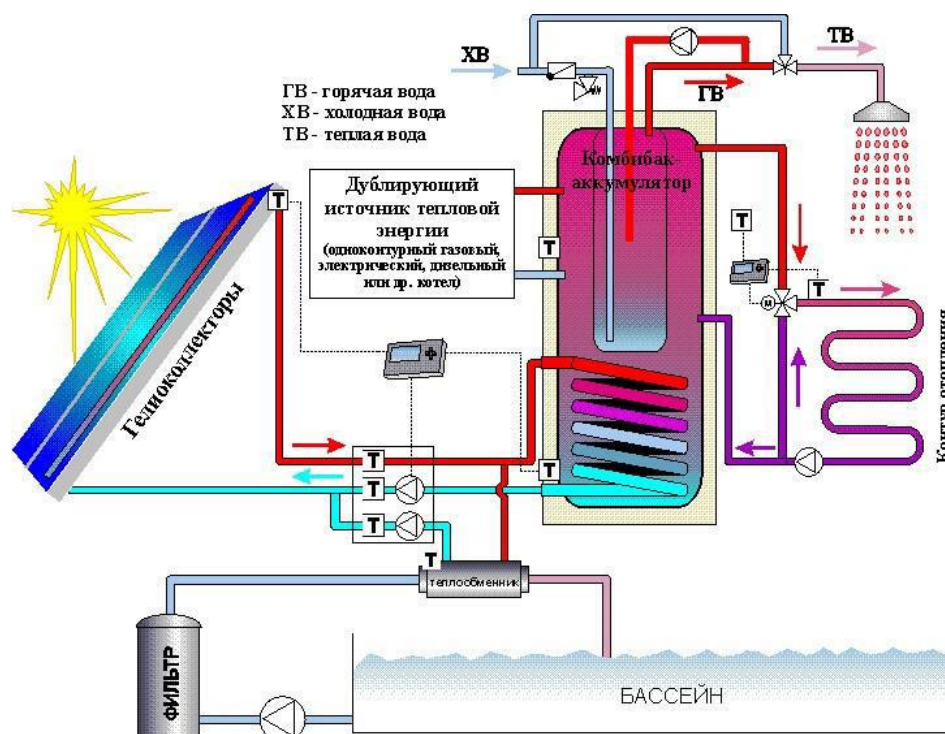
Енергія сонця є універсальним засобом в енергетиці. Оскільки сонячну енергію можна перетворити на електричну, теплову, механічну.

У системах гарячого водопостачання застосовуються термосифонні сонячні системи.

Термосифонні (рисунок 2.1) називаються сонячні водонагрівальні системи для нагрівання води з природною циркуляцією (конвекцією) теплоносія, які використовуються в умовах теплої зими. У більшості випадків вони не є найефективнішими сонячними системами, але мають багато переваг у плані будівництва житла.

Термосифонна циркуляція відбувається завдяки зміні густини води з її температурою. Така система складається із трьох основних частин:

- абсорбер (плоский колектор);
- трубопроводи;
- Бак-накопичувач гарячої води.



Малюнок 2.1 – Термосифонна сонячна система

Сонячна енергія може бути перетворена на електричну енергію двома основними способами: термодинамічний і фотоелектричний. Для перетворення сонячної енергії на електричну застосовуються спеціальні установки, призначені для уловлювання сонячних променів, за допомогою оптичних відбивачів та приймача сонячної енергії.

Також сонячна енергія активно застосовується у побутових сферах життя людини. Яскравим прикладом є сонячна кухня (рисунок 2.2). Сонячна кухня - це

побутова геліоустановка, яка призначена для приготування їжі. Основним елементом є сонячний концентратор, який фокусує сонячні промені на поверхні приймача випромінювання - посуду, в якому знаходиться їжа. Сонячні колектори часто використовуються для сонячних кухонь, але вони часто мають невисоку точність фокусування сонячних променів, оскільки вона коригується вручну, за рухом сонця. ККД такої установки складає 55-60%. Головною перевагою такої установки є те, що вона є компактною та вільно застосовується в похідних умовах, також вона є незамінною за відсутності газопостачання та має невисоку вартість.



Малюнок 2.2 – Сонячна кухня

Найбільш відомим застосуванням сонячної енергії є використання систем вуличного освітлення на сонячних батареях. Ці системи мають автономне джерело живлення на основі сонячного модуля, що дозволяє зробити освітлення мало затратним. Принцип роботи таких систем як надійний, а й простий. Протягом дня фотоелемент заряджає батареї та перетворює сонячну енергію на електрику. Вночі світильник вмикається автоматично і світиться до світанку.

При зарядці акумуляторів інтенсивність сонячного світла не має значення. Такий світильник здатний заряджатися навіть у похмуру погоду, не говорячи вже про зимовий сезон. На малюнку 2.3 показаний сонячний світильник із сонячною батареєю.



Малюнок 2.3 – Вуличний світильник із сонячною батареєю

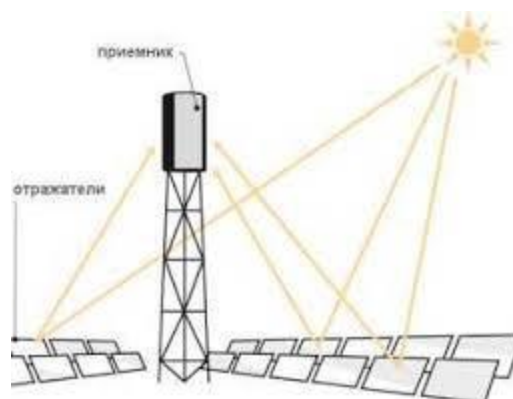
2.2 Види сонячних станцій

Сонячні електростанції за своєю формою та типами поділяються на декілька видів:

- фотоелектричні СЕС;
- тарілчасті СЕС;
- СЕС баштового типу;
- Комбіновані СЕС;
- Параболічні.

Станції баштового типу складаються з п'яти основних елементів: оптичної системи, автоматичної системи керування дзеркалами та станцією в цілому, парогенератора, вежі, яка утримує геліоприймач та системи перетворення енергії, що включає теплообмінники, акумулятори енергії та турбогенератори.

Оскільки на такій електростанції використовується пряме сонячне випромінювання, сонячні системи, що концентрують, повинні мати сонячну систему спостереження, і кожен геліостат індивідуально орієнтований в просторі. Температура, яку можна одержати на вершині вежі за допомогою дзеркальних концентраторів, становить 300–1500 °С. В одному модулі можна отримати потужність, що не перевищує 200 МВт, що пов'язано зі зменшенням ефективності передачі енергії від найвіддаленіших концентраторів до вершини вежі. На малюнку 2.4 показано схему сонячної станції баштового типу.



Малюнок 2.4 – Схема СЕС баштового типу

Світова практика експлуатації баштових станцій довела їх технічну здійсненність та ефективність. Основними недоліками таких установок є їхня висока

вартість і значна площа, яку вони займають. Таким чином, для розміщення баштової електростанції потужністю 100 МВт потрібна площа 200 га.

Сонячні електростанції найбільш ефективні в районах із високим рівнем сонячної радіації та низьким хмарним покривом. Їхня ефективність може досягати 20%, а потужність - 100 МВт.

Подібними за принципом роботи, але різними за будовою баштовим СЕС є тарілчасті сонячні станції.

Тарілчаста сонячна електростанція збирається з окремих модулів. Кожен модуль складається з опори, до якої кріпиться конструкція приймача та відбивача. На відстані від відбивача стоїть приймач, у якому концентруються відбиті сонячні промені. Відповідно для відбиття сонячних променів відбивач складається із дзеркал, які мають форму тарілки. Діаметри дзеркал можуть досягати 2 метрів залежно від потужності сонячної установки. Станції тарілчастого типу можуть використовуватися автономно або групою. На малюнку 2.5 показано схему тарілчастої СЕС.

Перевагою тарілчастих сонячних електростанцій є можливість відстеження сонячних променів в ході проходження світлового дня, за рахунок доопрацювання конструкції, Недоліком є дорожня установка, а також для покриття великих потужностей потрібна велика площа.

Сонячні електростанції, які використовують параболічні концентратори (рисунок 2.6), ґрунтуються на нагріванні теплоносія до параметрів, що використовуються у парових турбінах.



Малюнок 2.5 – СЕС тарілчастого типу

Сама по собі конструкція є параболічним дзеркалом великої довжини, де у фокусі параболі є трубки, по яких циркулює теплоносій (в основному застосовується

масло). Пройшовши весь шлях трубками, теплоносій розігрівається і теплообміннику віддає теплоту воді, яка перетворившись на пару надходить у парову турбину з генератором.

Різновидом параболічної СЕС є сонячна установка, у якої у фокусі концентратора знаходиться двигун Стірлінга. Дзеркала відбивають на двигун теплове випромінювання, тоді як одна сторона двигуна нагрівається відбитими променями, а друга охолоджується навколишнім середовищем. Водень, який задіяний у цій системі, штовхає поршень та обертає маховик, за рахунок регулярної зміни температури робочого тіла. Протягом дня такі установки слідує за сонцем, що вловити якнайбільше сонячних променів.



Рисунок 2.6 – Конструкція параболічного модуля

Сонячна комбінована станція за рахунок потрапляння сонячного проміння запускає теплорегуляційні петлі тепловіддачі. Такі електростанції оснащені низькотемпературною петлею з коректорами гелію, які в порівнянні з водою мають більш високий ККД і вигідні термодинамічні властивості. Двигуни такої електростанції виконані у вигляді об'ємної роторної парової машини по металоемності та надійності, що часом перевершують парові турбіни традиційних станцій. Загальний фотодинамічний коефіцієнт перевищує інші термобаричні сонячні електростанції.

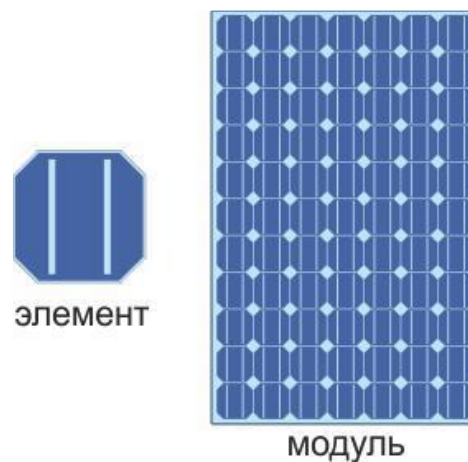
ККД чисто термодинамічного пароводяного циклу Ренкіна не перевищує найчастіше і 16%, що є значним недоліком таких сонячних електростанцій. Звідси впливає велике зниження ефективності землекористування і, відповідно, висока вартість обладнання, що веде до дуже великого терміну окупності. На малюнку 2.7 показано комбіновану СЕС.



Рисунок 2.7 – Комбінована сонячна станція з теплообмінником

2.3 Застосування сонячних променів у фотоелектричних станціях. Принцип роботи

У 21-му столітті найпопулярнішим видом сонячних станцій є сонячні станції з фотоелементами, оскільки на 1 квадратний метр поверхні землі при сонячному дні потрапляє 1000 Вт світлової енергії від сонця. Залежно від ділянки землі та географічного розташування щодо екватора такі станції є дуже ефективними. І можуть застосовуватись навіть для житлових будинків. Для поглинання цієї енергії застосовуються фотогальванічні елементи. На малюнку один 2.8 показаний фотоелектричний елемент та модуль.



Малюнок 2.8 – Ряд сонячних модулів

Принцип роботи фотоелектричного перетворювача заснований на використанні внутрішнього фотоелектричного ефекту в напівпровідниках та ефекту поділу фотогенерованих носіїв заряду (електронів та дірок) електронно-дірковим переходом або потенційним бар'єром типу метал-діелектрик-напівпровідник. Фотоелектричний ефект виникає, коли фотон (світловий пучок) падає на елемент із двох матеріалів з різними типами електропровідності (дірковий або електронний). Опинившись у такому матеріалі, фотон вибиває електрон із його оточення, утворюючи вільний

негативний заряд та "дірку". В результаті порушується рівновага так званого р-п-переходу і в ланцюзі виникає електричний струм. Пристрій, в якому відбувається фотогальванічний ефект і відбувається перетворення сонячної енергії називається фотоелементом. На малюнку 2.9 показано принцип роботи кремнієвого фотоелемента у сонячній панелі.



Рисунок 2.9 – Принцип роботи кремнієвого фотоелемента

Осередки фотоелемента виготовляються з напівпровідникових матеріалів, таких як монокристалічний або полікристалічний кремній, який під впливом світла виробляє електроенергію. У ясну погоду кремнієві осередки генерують електричний струм приблизно 25 мА при напрузі 0,5 на 1 см² площі осередку, тобто 12-13 мВт/см². Теоретичний ККД кремнієвих елементів становить близько 28%, практичний-від 14 до 20%.

Фотоелементи у свою чергу поділяються на декілька типів: кристалічні кремнієві: монокристалічні, полікристалічні; тонкоплівкові: аморфні, мікрокристалічні, нанокристалічні і таке інше.

Фотоелементи збираються на окремій металевій рамі, поверх якої кладеться матеріал, що відображає, після якого йде полімерна плівка, фотоелемент, другий шар полімерної плівки, а потім міцне захисне скло, яке ніяк не впливає на падіння сонячних променів.

Більшість панелей виробляються на основі моно і полі кремнію. Технологія виробництва сонячних модулів досить важка, дорога та енергоємна. Саме виробництво ділиться на 5 етапів:

- Отримання кремнію;
- Вирощування кристалів;

- Обробка;
- Створення фотоелектричного елемента;
- Складання готового модуля.

На першому етапі отримання кремнію в якості сировини використовують кварцовий пісок, який має високий масовий вміст діоксиду кремнію. Для позбавлення його від кисню він проходить багатоступінчасте очищення, за рахунок високотемпературного плавлення та синтезу з додаванням хімічних речовин.

Після цього на другому етапі очищений кремній виглядає як розрізнені шматки. Для отримання кристалів використовується метод Чохральського, згідно з яким шматки кремнію поміщаються в спеціальні форми (тигель), де їх плавлять і вони розтікаються в чітку структуру. Сам собою даний етап займає тривалий період часу, але зрештою виходить однорідний кристал.

Третій етап починається з виміру та обробки кристала для надання потрібної йому форми. Так як, виходячи з тигеля, він має у перерізі круглу форму, що не дуже зручно для подальшого використання. Для спрощення використання монокристалу надається псевдоквадратна форма, після чого він ріжеться на пластини.

На передостанньому етапі, кремній додається бор і фосфор, щоб він міг виробляти електричну енергію. Саме завдяки цьому етапу шар фосфору отримує вільні електрони, а сторона бору – відсутність електронів, тобто дірки, тому виходить p-n перехід.

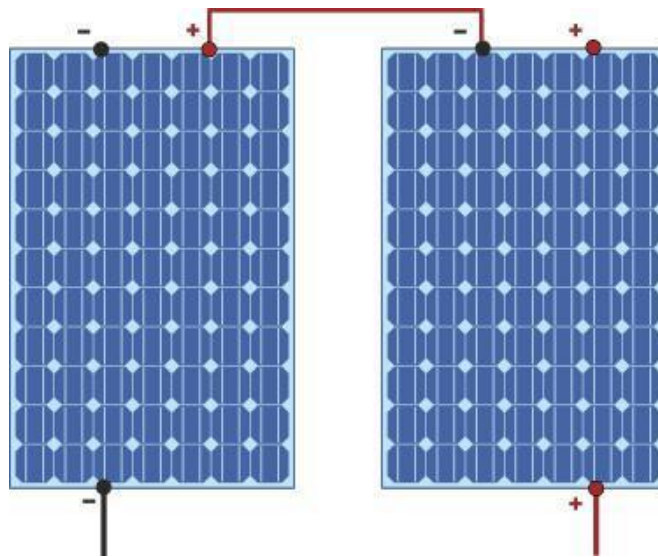
На останньому етапі пластинки з'єднуються спочатку в ланцюжки, а потім у блоки. Як правило, одна така пластина має потужність 2 Вт і напругу 0,5 В. Відповідно чим більше буде кількість таких блоків, тим вище потужність видаватиме готова сонячна панель.

Усі сонячні модулі класифікуються за піковою потужністю в пікових ватах. Відповідно один піковий ват - це величина, що вказує значення потужності установки, коли сонячне випромінювання в 1 кВт/м² падає на елемент при температурі 25 градусів. Але такі пікові показники вкрай рідко досягаються навіть за сонячного дня, тому що модуль нагрівається і ефективність знижується.

Як і будь-які електричні елементи, сонячні модулі мають кілька видів з'єднання між собою:

- Послідовне з'єднання;
- Паралельне з'єднання;
- Послідовно-паралельне з'єднання.

При послідовному з'єднанні мінусова клемма першої сонячної панелі з'єднується з плюсовою клемою другою, мінусова другою з клемою третьою і так далі. Виходячи з законів фізики, при послідовному з'єднанні декількох панелей напруга буде складатися, звідси випливає, що струм системи дорівнюватиме струму батареї. На малюнку 2.10 продемонстровано схему послідовного з'єднання.



Малюнок 2.10 – Послідовне з'єднання модулів

При паралельному з'єднанні (малюнок 2.11) клемми з однаковими полюсами підключаються один до одного за допомогою Y-конекторів. А потім від клем одного з модулів виводяться дроти, які надалі підключаються до контролера заряду або безпосередньо до акумулятора. У такому з'єднанні сумуються струми панелей, а максимальна вихідна напруга обмежується панеллю з меншою напругою на виході.

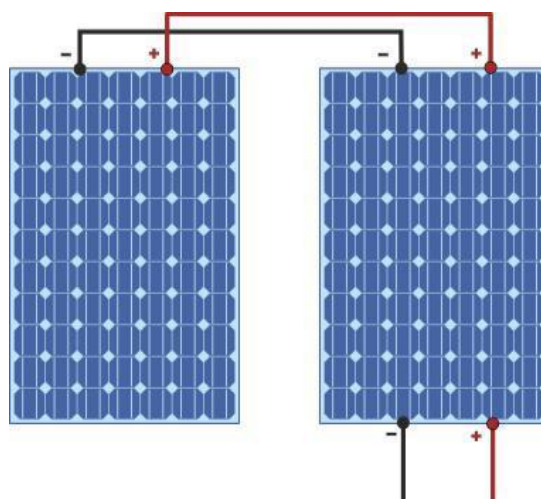


Рисунок 2.11 – Паралельне з'єднання модулів

При послідовно-паралельному з'єднанні з'являється можливість регулювати напругу та струм на виході з кількох батарей, що пропонує оптимальний режим роботи СЕС.

У послідовно-паралельних сполуках сонячні елементи утворюють сонячну (фотоелектричну) батарею. Потужність сонячних панелей, що серійно випускаються промисловістю, становить 50-200 Вт.

2.4. Схеми роботи фотоелектричних сонячних станцій. Додаткове обладнання

Сонячні фотоелементи можуть працювати за кількома видами підключення:

- Схема з автономним харчуванням;
- Схема комутації з електричною мережею;
- Схема з резервним дизель генератором.

При розгляді кожної схеми можна виявити свої переваги та недоліки.

Так, наприклад, при автономній схемі (рисунок 2.13) живлення користувача, за наявності відповідного додаткового обладнання, споживач живиться від сонячних панелей протягом усього світлового дня, а при настанні темного часу доби вся енергія, накопичена, але невикористана вдень залишиться в акумуляторних батареях що дозволить споживачеві мати харчування у нічний час доби. Автономна сонячна електростанція складається з сонячних панелей, інвертора із вбудованим або зовнішнім зарядним пристроєм та акумуляторних батарей.

Дана схема з'єднання є дуже корисною, оскільки споживач не залежить від живлення мережі, але в цьому також є свій недолік. Тобто, якщо похмурий день, то споживач не зможе отримувати електроенергію від автономної сонячної станції. Також вагомим недоліком є дорожнеча таких установок через наявність акумуляторних батарей.



Малюнок 2.13 – Схема автономної роботи СЕС

Для всіх сонячних електростанцій необхідне додаткове обладнання таке як:

- акумуляторні батареї;
- контролери заряду;
- інвертори;
- сполучні кабелі та конектори.

Акумулятор (малюнок 2.14) на сонячній електростанції необхідний для накопичення енергії та її подальшого використання у темний час доби.

Акумуляторні батареї розрізняються за: номінальною напругою, номінальною ємністю, габаритами, типом електроліту, ресурсом, швидкістю заряду і так далі.

Для акумуляторів на СЕС пред'являються спеціальні вимоги, яким вони повинні відповідати:

- велика циклічність;
- Мінімальний саморозряд;
- Широкий діапазон робочих температур.

Найбільш оптимальним варіантом при виборі акумуляторних батарей для СЕС є свинцево-кислотні акумулятори, оскільки вони мають тривалий термін служби, відповідають усім вимогам і найдешевші.



Малюнок 2.14 - Акумуляторна батарея

Додатково до акумуляторної батареї на станції також встановлюються контролери заряду-розряду батареї (рисунок 2.15).

Контролер заряду на сонячній електростанції необхідний для:

- автоматичне підключення сонячної батареї на зарядку акумулятора;
- Автоматичного відключення модуля при повному заряді АКБ;
- Автоматичне відключення навантаження при встановленні рівня заряду АКБ.

З додаткових особливостей деяких контролерів можна виділити наявність у них реле часу, заряджання двох незалежних АКБ, відповідність стандартам пилу та вологозахисту. Також багато панелі мають розширену кількість ступенів захисту.



Малюнок 2.15 - Контролер заряду для сонячної батареї

Наявність інвертора (рисунок 2.16) на автономній сонячній електростанції є обов'язковою, оскільки інвертор призначений для інвертування постійної напруги акумуляторної батареї в змінну. При виборі інвертора необхідно враховувати критерії:

- Вхідна напруга;
- номінальна та максимальна потужність;
- Форма вихідного струму;
- Маса;

- Наявності вентилятора;
- кількість захисних механізмів;
- ККД;
- Витрачена потужність без навантаження;
- наявності режиму очікування, що допоможе заощадити енергію, накопичену в АКБ (акумуляторних батареях);
- Оптимальний температурний діапазон роботи.



Малюнок 2.16 – Інвертор для сонячної станції

Сонячні модулі з'єднуються між собою за допомогою з'єднувальних кабелів або конекторів, які входять до комплекту сонячних модулів. Для правильного вибору кабелю необхідно враховувати опір кабелю, а також прокласти кабель максимально короткою трасою.

Для спрощення підключення в комплекті до сонячної панелі йдуть конектори на плюс полюс і мінус полюс, які відповідно маю різні з'єднання, що дозволяє уникнути замикання при підключенні. На малюнку 2.17 показані конектори та кабелі для з'єднання сонячних модулів.

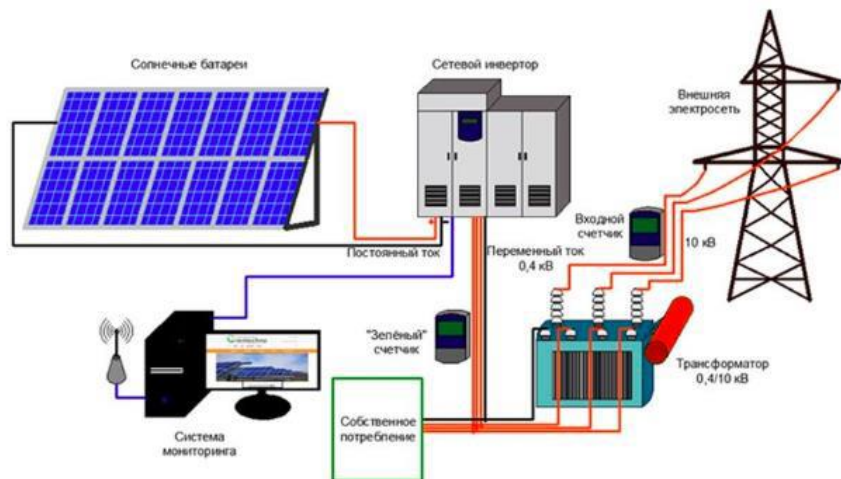
При виборі схем СЕС найчастіше вибирають схему роботи з мережею. У мережевих сонячних електростанціях використовується інвертор мережного типу, він здатний безпосередньо скидати вироблену сонячними панелями.

енергію, у внутрішньоденну мережу, а надлишки (не спожиту енергію) направляти у зовнішню мережу для продажу за зеленим тарифом.



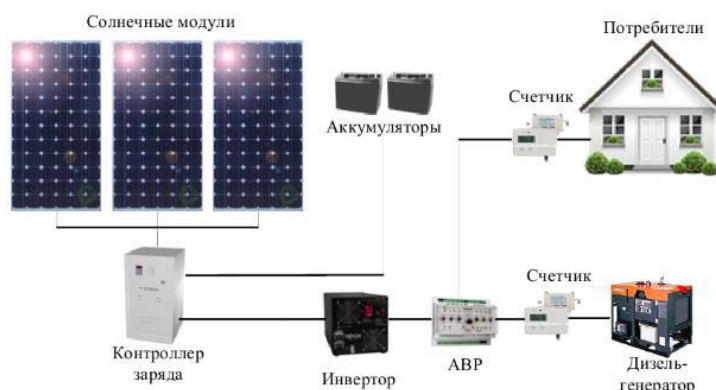
Рисунок 2.17 – Конектори та кабелі приєднання

У мережних сонячних електростанціях надлишок електрики передається до мережі через окремий лічильник - двонаправлений вузол обліку. Якщо є недолік електрики, ви забираєте недостатню кількість електрики із зовнішньої мережі. Схема роботи з мережею показано малюнку 2.18.



Малюнок 2.18 – Схема роботи СЕС із мережею

Схема роботи з генератором дизель (рисунок 2.19) є більш надійною на відміну від автономної СЕС. Так як у разі похмурого дня та розряду акумуляторів відбувається автоматичний запуск дизель генератора із підзарядкою акумуляторної станції. Звідси впливає, що ця схема є більш надійною, але при цьому ціна обладнання також зберігається високою.



Малюнок 2.19 – Схема роботи СЕС із резервним дизель-генератором

Крім вище перерахованих схем з'єднання, також існує гібридна схема з'єднання (рисунок 2.20), тобто із застосування двох видів енергій, а саме енергії сонця та енергії вітру. Така схема працює через гібридний контролер або за допомогою окремого контролера для вітроустановки. Така схема дозволяє створити повністю автономне безперебійне живлення. Система може бути повністю автономною при підключенні до неї АВР чи дизель-генератора.

Основною перевагою такої системи є висока надійність, оскільки застосовуються два джерела енергії. При цьому можна зменшити розмір акумуляторних батарей.



Рисунок 2.20 – Гібридна схема з'єднання

2.4.1 Моделювання мережі

В автономному режимі в якості мережі передбачається встановлення дизель-генератору, що призначений для резервного живлення власних потреб фотоелектричної станції у нічний час доби. Дизель-генератор оснащений шумопоглинаючим всепогодним капотом для встановлення на відкритому повітрі.

В денний час територія фотоелектричної станції може отримувати резервне живлення від генерації СЕС, у нічну добу резервним живленням служить дизель-генератор.

Обираю генератор ВДГ 190-600, з такими характеристиками (табл.2.1):

Таблиця 2.1 - Параметри генератора.

Кількість фаз	3
Номинальный момент, Мн	192 Нм
Номинальный струм, Ін	17 А
Номинальная частота обертання, пн	105 об/хв
Число пар полюсів, р	30
Опір фази, R	0,493 Ом
Коефіцієнт перетворення, См	11,3
Індуктивність, L	8,35 мГн
Вага ротора, G	7,1 кг
Діаметр ротора, D	0,51 м
Момент інерції ротора, J	0,46 кг*м ²

Для моделювання генератора в програмному середовищі Simulink використовувався блок Permanent Magnet Synchronous Machine (рис.2.18).

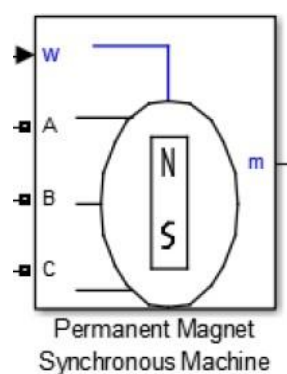


Рисунок 2.18 - Блок генератора

Параметри блоку були приведені у відповідність з характеристиками ВДГ 190-600 (рис.2.19).

Для завдання номінальної частоти обертання на вхід моделі 'w' подається константа 105.

<p>Permanent Magnet Synchronous Machine (mask) (link)</p> <p>Implements a three-phase or a five-phase permanent magnet synchronous machine. The stator windings are connected in wye to an internal neutral point.</p> <p>The three-phase machine can have sinusoidal or trapezoidal back EMF waveform. The rotor can be round or salient-pole for the sinusoidal machine, it is round when the machine is trapezoidal. Preset models are available for the Sinusoidal back EMF machine.</p> <p>The five-phase machine has a sinusoidal back EMF waveform and round rotor. Preset models are not available for this type of machine.</p>	<p>Permanent Magnet Synchronous Machine (mask) (link)</p> <p>Implements a three-phase or a five-phase permanent magnet synchronous machine. The stator windings are connected in wye to an internal neutral point.</p> <p>The three-phase machine can have sinusoidal or trapezoidal back EMF waveform. The rotor can be round or salient-pole for the sinusoidal machine, it is round when the machine is trapezoidal. Preset models are available for the Sinusoidal back EMF machine.</p> <p>The five-phase machine has a sinusoidal back EMF waveform and round rotor. Preset models are not available for this type of machine.</p>
<p>Configuration Parameters Advanced</p> <p>Number of phases: 3</p> <p>Back EMF waveform: Sinusoidal</p> <p>Rotor type: Round</p> <p>Mechanical input: Speed w</p> <p>Preset model: No</p> <p>Measurement output <input type="checkbox"/> Use signal names to identify bus labels</p>	<p>Configuration Parameters Advanced</p> <p>Stator phase resistance Rs (ohm): 0.493</p> <p>Armature inductance (H): 0.00835</p> <p>Machine constant Specify: Voltage Constant (V_peak L-L / krpm)</p> <p>Flux linkage: 1.1762</p> <p>Voltage constant: 640</p> <p>Torque constant: 5.2928</p> <p>Pole pairs p (): 3</p> <p>Initial conditions [wm(rad/s) thetam(deg) ia,ib(A)]: [10,0,0,0]</p>

Рисунок 2.19 - Параметри блоку генератора.

Модель генератора складається з електричної частини, механічної частини і блоку вимірів (рис.2.20):

лежать в одній площині, далі перетворюються в обертову систему координат, з спрямовану з вектором потокозчеплення (2.30), що дозволяє виділити складову, визначальну електромагнітний момент [14].

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_a(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix}$$

(2.29)

$$\begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\Theta_e) & \sin(\Theta_e) \\ -\sin(\Theta_e) & \cos(\Theta_e) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix}$$

(2.30)

Блок abc2qd, див. рис.2.21, виробляє пряме перетворення Парка фазних напруг генератора в напругу поздовжньої і поперечної координат. В аналітичному поданні:

$$U_q = \frac{1}{3} (\cos \Theta_e \cdot (2U_{ab} + U_{bc}) + (\sqrt{3} \cdot U_{bc} \cdot \sin \Theta_e)) \quad (2.31)$$

$$U_d = \frac{1}{3} (\sin \Theta_e \cdot (2U_{ab} + U_{bc}) + (-\sqrt{3} \cdot U_{bc} \cdot \cos \Theta_e)) \quad (2.32)$$

де U_d - q складова напруги;

U_q - d складова напруги.

Лінійні фазні напруги U_{ab} та U_{bc} визначаються за формулами:

$$U_{ab} = U_a - U_b \quad (2.33)$$

$$U_{bc} = U_b - U_c \quad (2.34)$$

У блоці на підставі фазних напруг поздовжньої і поперечної складової фазної напруги розраховуються відповідні складові фазних струмів i_d та i_q .

$$i_q = \int \left(\frac{U_q}{L_q} - \omega_E \cdot \frac{Flux}{L_q} - \frac{L_d}{L_q} \cdot \omega_E \cdot i_d - \frac{R}{L_q} i_q \right) dt \quad (2.35)$$

$$i_d = \int \left(\frac{U_d}{L_d} - \frac{L_d}{L_q} \cdot \omega_E \cdot i_d - \frac{R}{L_q} i_d \right) dt \quad (2.36)$$

де i_q - q складова струму;

i_d - d складова струму;

$Flux$ - магнітний потік ротора; L_d - d складова індуктивності; L_q - q складова індуктивності.

Блок Te (див. рис. 2.21) обчислює електромагнітний момент, використовуючи складові струму за такою формулою:

$$1.5 * p * (Flux * i_q(1) + (L_d - L_q) * i_q * i_d) \quad (2.37)$$

Блок $qd2abc$ (див. рис. 2.21) виробляє зворотне перетворення Парка - Кларка складових струмів поздовжньої і поперечної координат i_d та i_q в амплітуди фазних струмів i_a , i_b , i_c . В аналітичному поданні:

$$i_a = i_q \cdot \cos \theta_e + i_d \sin \theta_e \quad (2.38)$$

$$i_b = \frac{1}{2} \left(\cos \theta_e \cdot (-i_q - \sqrt{3} \cdot i_d) + \sin \theta_e \cdot (i_d + \sqrt{3} \cdot i_q) \right) \quad (2.39)$$

$$i_c = -(i_a + i_b) \quad (2.40)$$

$$T_s = \frac{1}{2} \left(PM.p \cdot (Flux \cdot i_q + (PM.L_d - PM.L_q) \cdot i_q \cdot i_d) \right) \quad (2.41)$$

На вхід механічної частини надходить зовнішній і електромагнітний момент, на виході обчислюються значення електричного і фізичного кута і частоти обертання ротора.

$$\omega_e = \text{PM.p} \cdot \int \left(\frac{1}{j} \cdot (T_E - T_M) \right) dt \quad (2.42)$$

$$\theta_e = \int (\omega_e) \quad (2.43)$$

$$\omega = \frac{\omega_e}{\text{PM.p}} \quad (2.44)$$

$$\theta = \frac{\theta_e}{\text{PM.p}} \quad (2.45)$$

2.4.2 Моделювання акумуляторної батареї

Блок акумуляторної батареї в середовищі Matlab \ Simulink представлений на рис. 2.22.

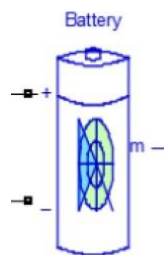


Рисунок 2.22 - Блок АКБ

Для акумуляторної батареї використовуються свинцево-кислотний акумулятори з номінальною напругою 48В і сумарною місткістю 1250А * год.

Параметри блоку АКБ представлені на рис.2.23.

Parameters Discharge		Parameters Discharge	
Type:	Lead-Acid	<input type="checkbox"/> Determined from the nominal parameters of the battery	
Nominal voltage (V)	48	Maximum capacity (Ah)	275
Rated capacity (Ah)	250	Cut-off Voltage (V)	35
Initial state-of-charge (%)	50	Fully charged voltage (V)	55
Battery response time (s)	3	Nominal discharge current (A)	2
		Internal resistance (Ohms)	2
		Capacity (Ah) at nominal voltage	255
		Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]	[49 100]

Рисунок 2.23 - Параметри блоку АКБ

Структура блоку АКБ представлена на рис.2.24.

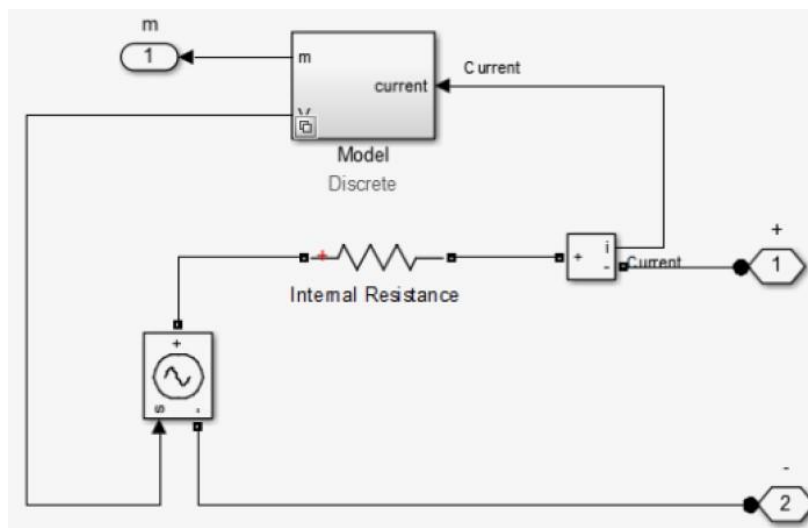


Рисунок 2.24 - Структура блоку АКБ

Вихід m блоку Model дозволяє отримати дані про рівень акумуляторної батареї, напругу і струм зарядки \ розрядки і рівні акумуляторної батареї.

2.4.3 Моделювання трифазного інвертора

Інвертор (DC / AC converter) - пристрій для перетворення постійного струму в змінний зі зміною величини частоти або напруги. Зазвичай являє собою генератор періодичної напруги, за формою наближеного до синусоїди, або дискретного сигналу. Блок генератора приведений на рис.2.25.



Рисунок 2.25 - Блок інвертора.

Робота інвертора напруги заснована на перемиканні джерела постійної напруги з метою періодичної зміни полярності напруги на затискачах навантаження. Частота перемикання «задається» сигналами управління, які формувались керуючої схемою (контролером). Контролер також може вирішувати додаткові завдання:

- регулювання напруги;
- синхронізація частоти перемикання ключів;
- захистом їх від перевантажень; та ін.

Інвертори з синусоїдальною формою вихідної напруги (рис.2.26).

Принцип побудови такого інвертора полягає в тому, що за допомогою попереднього високочастотного перетворення отримують напругу постійного струму, значення якого близько до амплітудному значенням синусоїдальної вихідної напруги інвертора. Потім цю напругу постійного струму за допомогою, як правило, мостового інвертора перетворюється в змінну напругу за формою, близьке до синусоїдальному, за рахунок застосування відповідних принципів управління транзисторами цього мостового інвертора. Ідея цієї «багаторазової» ШІМ полягає в тому, що на інтервалі кожного напівперіоду вихідної напруги інвертора відповідна пара транзисторів мостового інвертора комутується на

високій частоті (багаторазово) при широтно-імпульсному управлінні. Причому тривалість цих високочастотних імпульсів комутації змінюється за синусоїдальним законом. Потім за допомогою високочастотного фільтра нижніх частот виділяється синусоїдальна складова вихідної напруги інвертора [14].

Інвертор побудований на 6 IGBT транзисторах, з'єднаних зустрічно паралельно з діодами. Падіння напруги на IGBT транзисторах у відкритому статки становлять 2 Вольт, на діодах 0.8 Вольт.

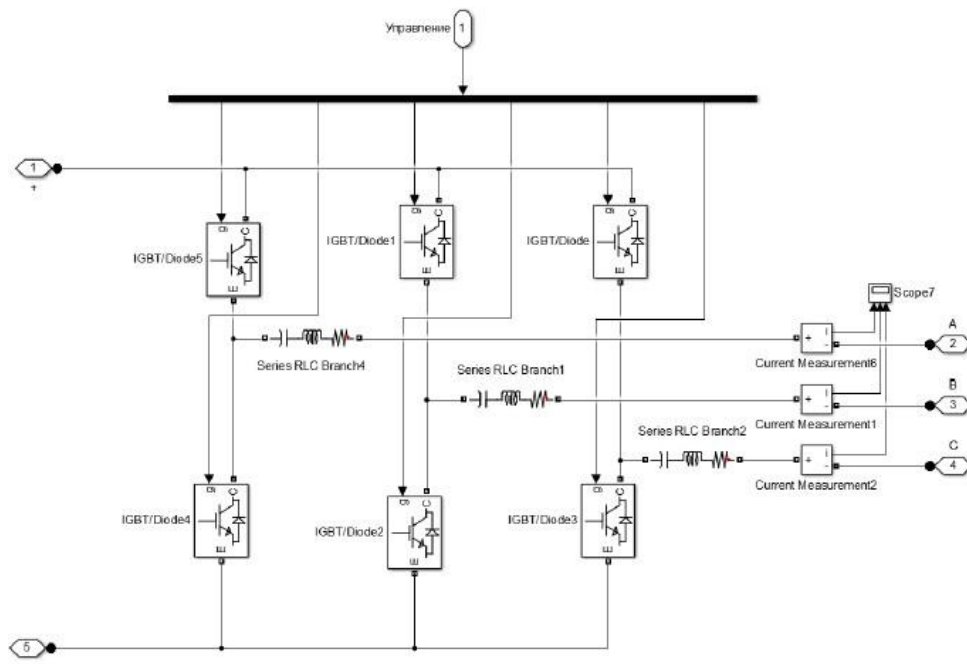


Рисунок 2.26 - Структура блока інвертора.

Широтно-імпульсний сигнал, що керує роботою інвертора приходить на кожен з шести транзисторів і реалізується блоком управління. Параметри транзисторів представлені на рис. 2.27.

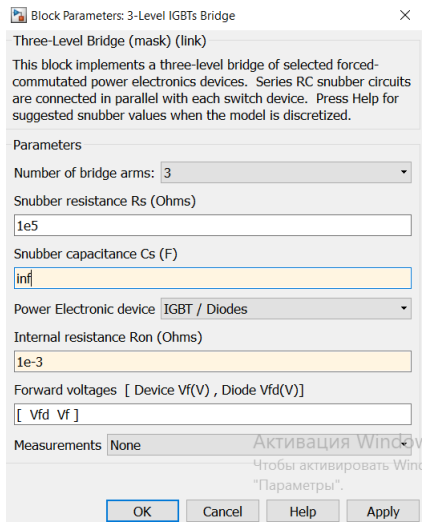


Рисунок 2.27 - Параметри транзисторів.

2.4.4 Моделювання блоку керування інвертором

Блок управління (рис.2.28) необхідний для забезпечення керуючих сигналів. В ньому генерується широтно-імпульсний сигнал, і відбувається перемикання між режимами ведучого і веденого.

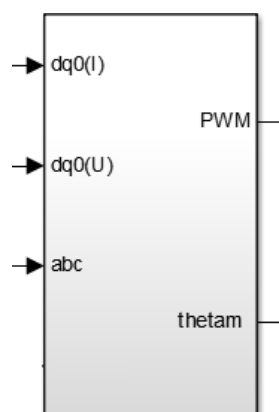


Рисунок 2.28 - Блок керування інвертором

Структурна схема блоку керування інвертором представлена на рис.2.29.

Перемикання між режимами ведучого і веденого проводиться при відсутності і наявності напруги в мережі відповідно.

Даний блок служить для синхронізації з мережею в режимі веденого, визначення наявності напруги на ньому для перемикання між режимами, а також для завдання кута в режимі ведучого.

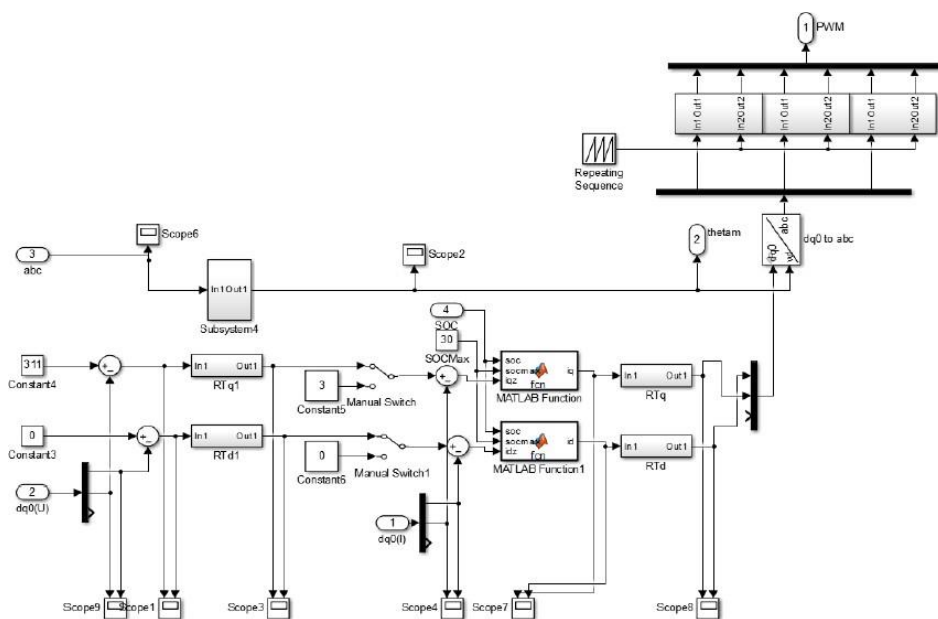
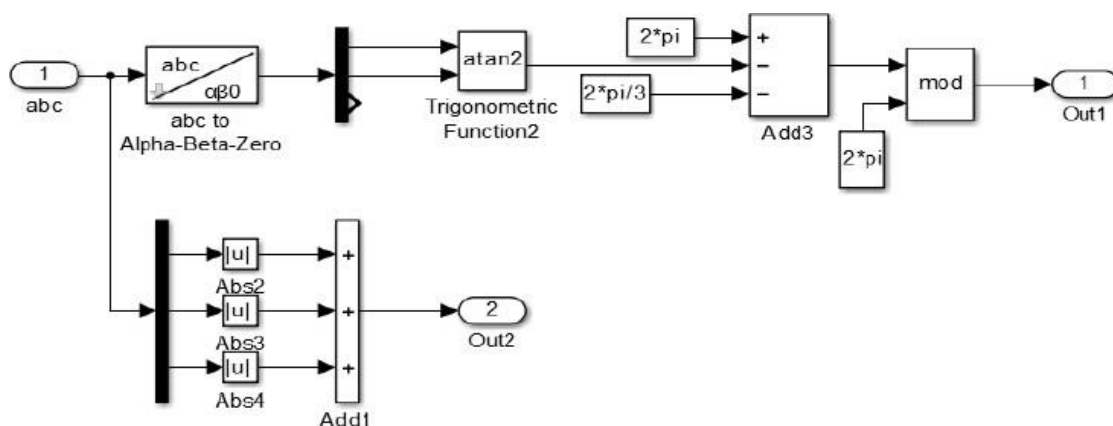


Рисунок 2.29 - Структурна схема блоку керування інвертором. Розглянемо детальніше складові елементи блоку керування (рис.2.30).



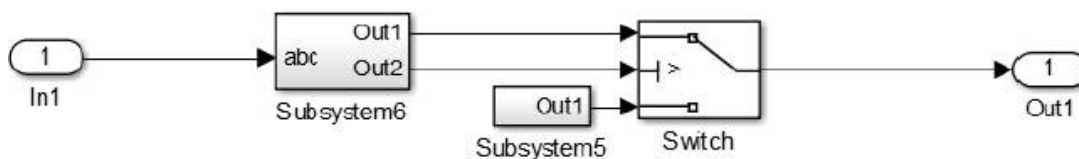


Рисунок 2.30 - Структурна схема блоку синхронізації з мережею На рис.2.31 представлений контур завдання напруги і обчислення помилки.

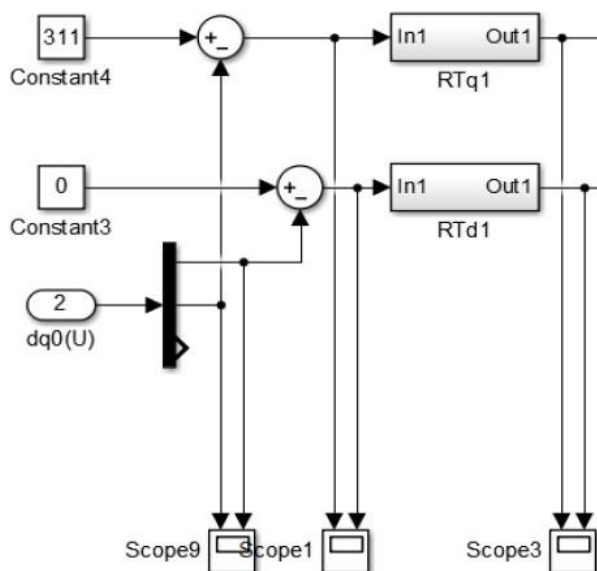


Рисунок 2.31 - Регулятор контуру напруги Параметри регулятора контуру напруги представлені на рис 2.32.

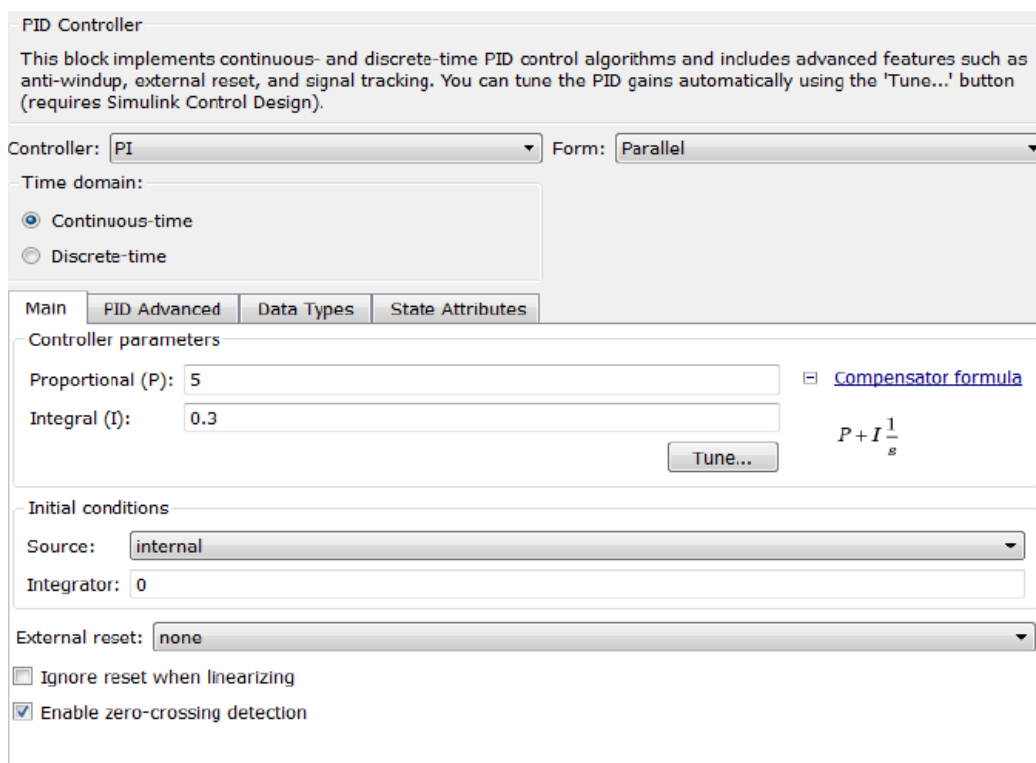


Рисунок 2.32 - Параметри регулятора контуру напруги

На рис. 2.33 представлений контур завдання струму.

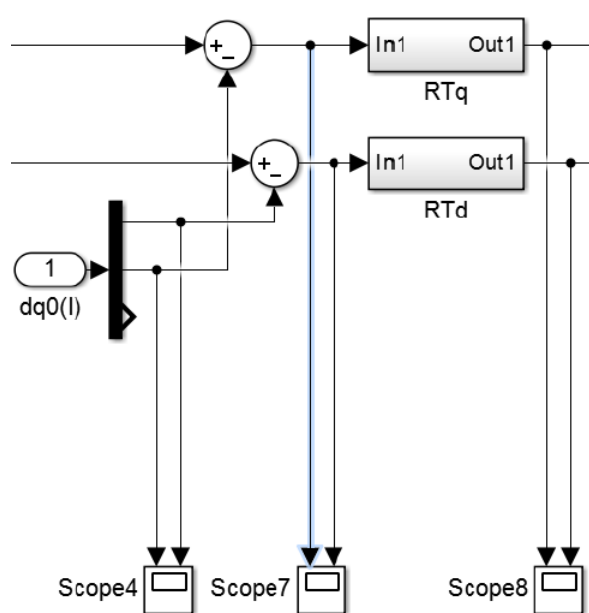


Рисунок 2.33 – Регулятор контуру струму
Параметри регулятора контуру напруги представлені на рис.2.34

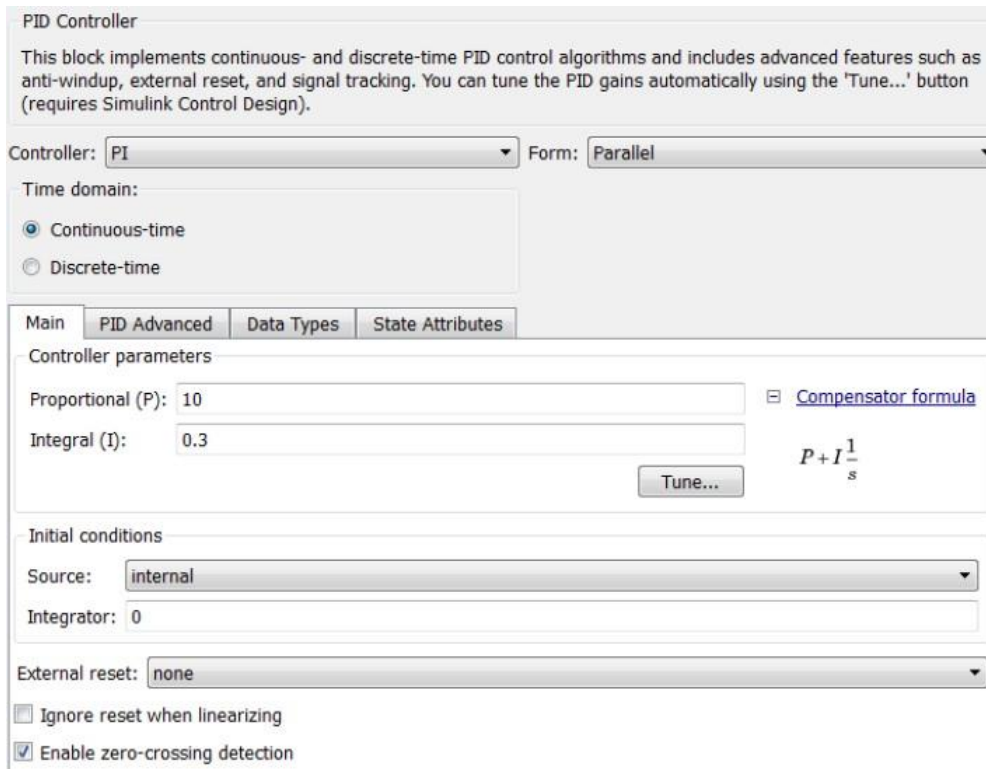


Рисунок 2.34 - Параметри регулятора контуру напруги

Для того, щоб задані значення струму трансформувались в трифазну мережу потрібно застосувати блок зворотного перетворення Парка-Кларка (рис.2.35).

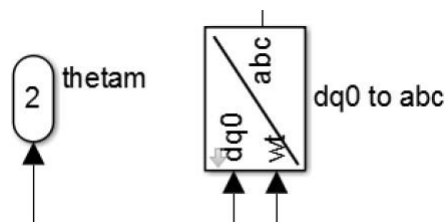


Рисунок 2.35 - Зворотне перетворення Парка-Кларка

Блоки зворотного перетворення Парка-Кларка надходять на блоки, що генерують ШІМ сигнал (рис.2.36).

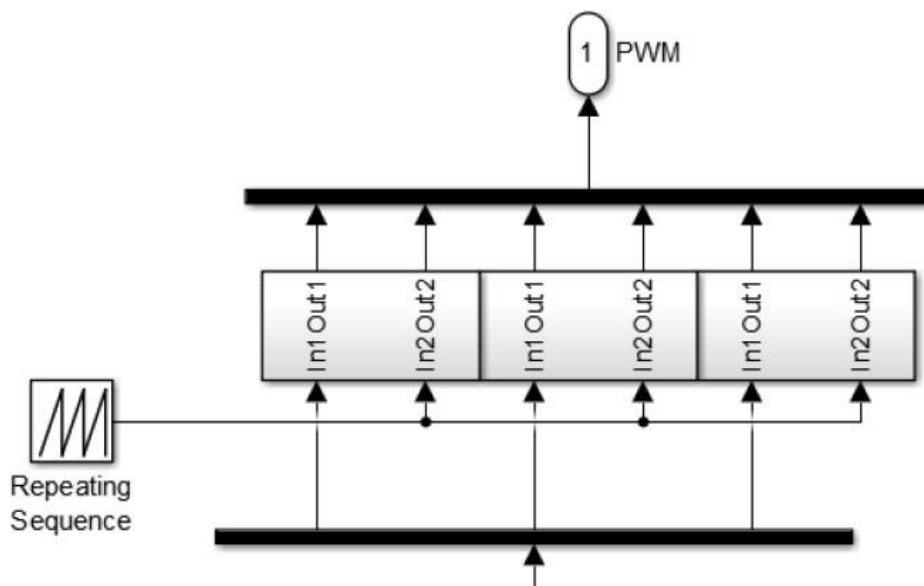


Рисунок 2.36 - Блок, що генерує ШІМ сигнал

Генерація ШІМ сигналу представлена на рис.2.37

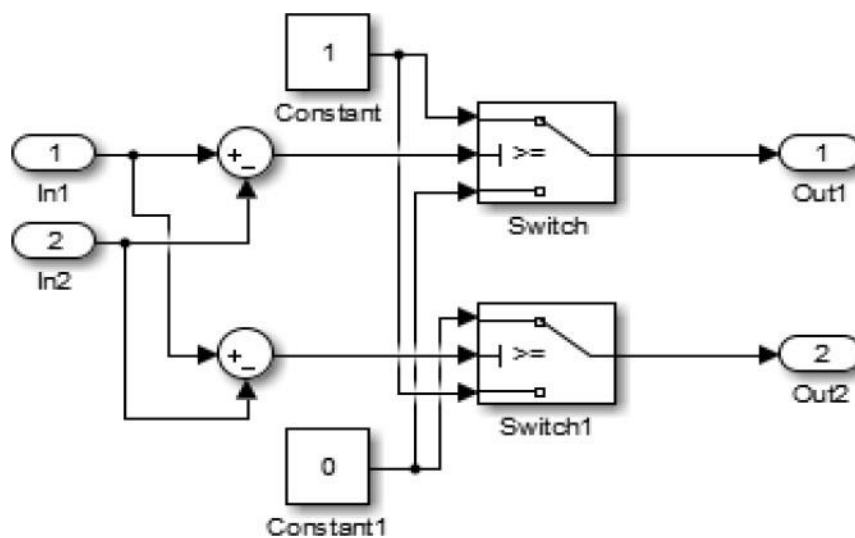


Рисунок 2.37 - Генерація ШІМ сигналу

2.4.5 Перетворення для створення контурів напруги і струму

Для створення контурів напруги і струму, а так само для синхронізації інвертора з мережею, нам знадобляться декілька видів перетворень. Блоки представлені на рис.2.38.



Рисунок 2.38 - Блоки перетворень

де блок «abc to dq0» – пряме перетворення Парка-Кларка (2.46)

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$$

, (2.46)

блок «dq0 to abc» – зворотнє перетворення Парка-Кларка (2.47)

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 1 \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix}$$

(2.47)

блок «abc to αβ0» – перетворення трифазної системи в двохфазну (2.48).

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$$

(2.48)

Для прямого і зворотного перетворення Парка-Кларка потрібно подати на вхід блоку значення ωt . Також варто відзначити наявність налаштувань у даних блоків. У Rotating Frame Alignment at $\omega t = 0$ слід вказувати Aligned with Phase A axis, в іншому випадку інвертор буде генерувати струм, який не збігається за фазою із струмом мережі, що призведе до неправильного їх підсумовування на навантаженні, і, як наслідок, збільшення його видають інвертором струму.

2.4.6 Моделювання навантаження

Блок навантаження представлена на рис. 2.39.



Рисунок 2.39 - Згорнутий блок навантаження.

У даній моделі для демонстрації різних режимів роботи використовувалися різні типи навантаження. Найчастіше навантаження представляла собою набір резисторів з однаковим опором (рис.2.40).

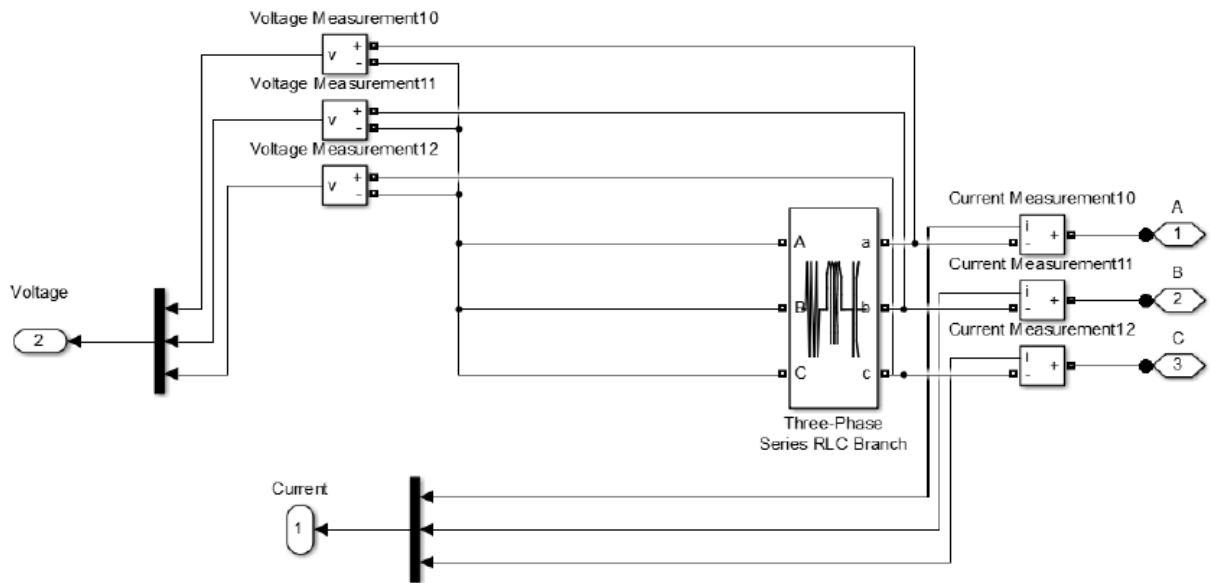


Рисунок 2.40 - Структура блоку навантаження, де резистори з однаковимпором.

В іншому випадку навантаження представляла собою два послідовно з'єднаних резистора на кожну фазу. Другі резистори включаються і відключаються від зовнішнього сигналу, що надходить на вимикач (рис.2.41).

У двох варіантах блок навантаження виходи Current і Voltage -інформаційні канали струму і напруги відповідно.

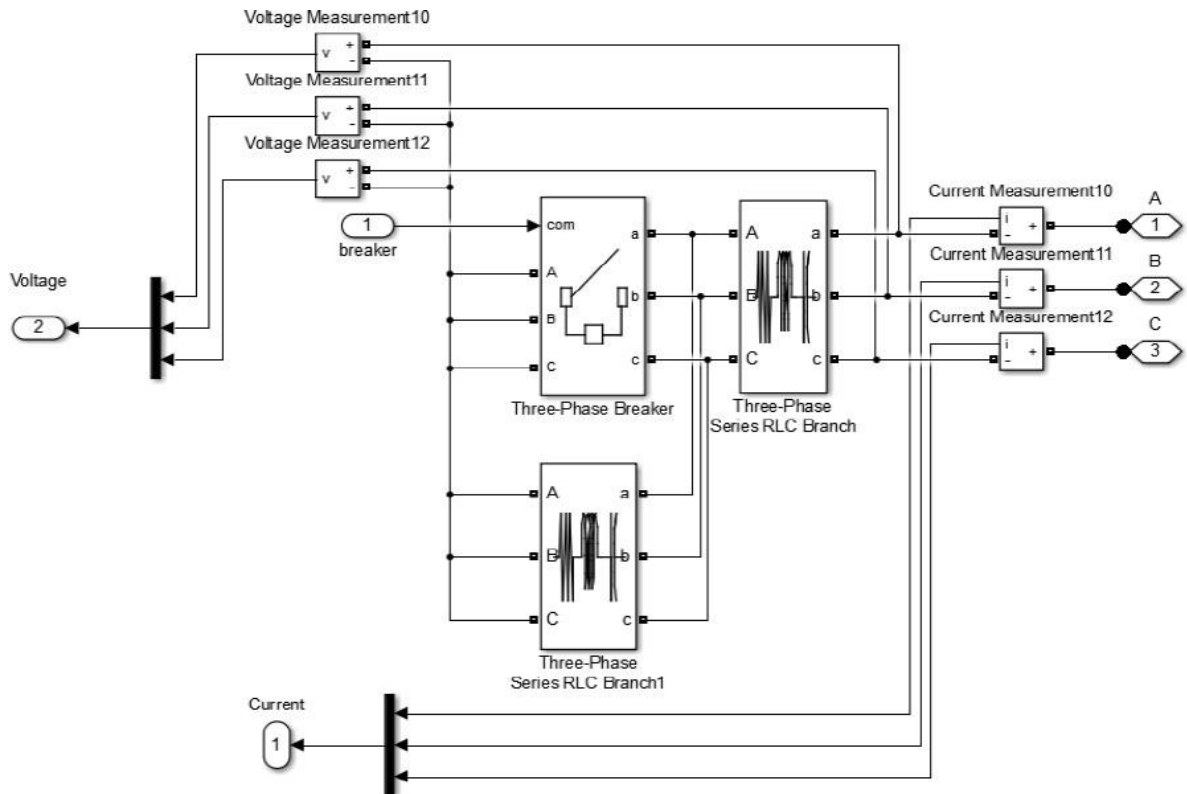


Рисунок 2.41 - Структура блоку навантаження з послідовно з'єднаними резисторами на кожен фазу.

Змодельуємо роботу СЕС, що виступає як активний фільтр для мережі

Такого типу СЕС можна підключати до мережі не як джерело живлення, а як фільтр для покращення показників якості електроенергії.

2.5 Моделювання підстанції

За допомогою програмного забезпечення Matlab / Simulink складаємо блок схему моделі мережі та споживачів.

2.5.1 Моделювання ланцюгів споживачів

Розглянемо детальніше схему, зображену на рис.2.42 і розберемо параметри і призначення кожного з елементів.

Блок «Source» - джерело живлення напругою, що заміщує собою лінію.

Блок «Load» - представляє собою електричне навантаження (потужність), що підключається до мережі від інших споживачів.

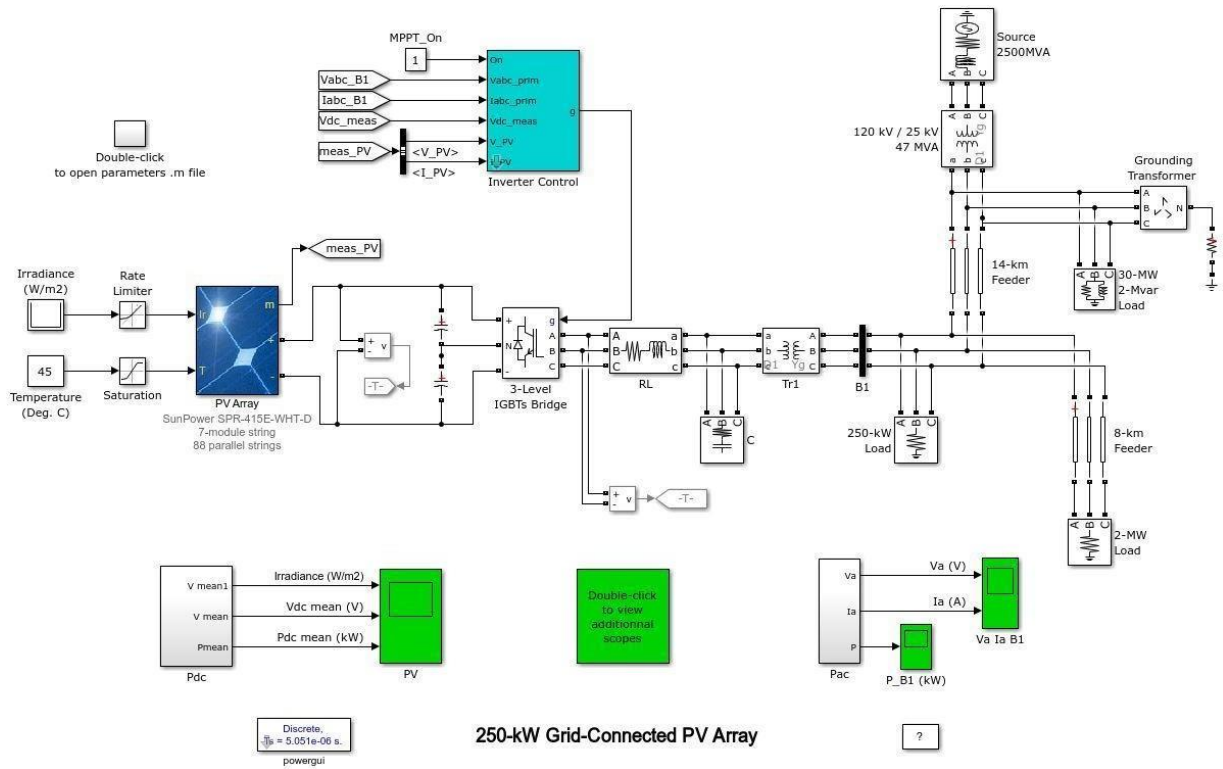


Рисунок 2.42 - Блок-схема моделі споживачів.

Блок «Tr» - представляє понижуючий трансформатор.

Для цілей моделювання активні та індуктивні опори обмоток трансформаторів та їх індуктивності повинні бути розраховані окремо для обмоток високої, низької і, якщо є, середньої напруги. Для цього, напруга короткого замикання $U_k, \%$, має бути знайдено для кожної з обмоток. У двообмоткових трансформаторах, U_k визначається за виразом:

$$u_{k(e)} = u_{k(n)} = 0,5u_k, \quad (2.49)$$

Опори r_T , Z_T , X_T , O_M , і індуктивність L_T , Γ_n , кожної з обмоток трансформатора обчислюються за такими формулами [15]:

$$r_T = 3 \cdot \frac{P_K \cdot U_\phi^2}{(S_{T_НОМ})^2}, \quad (2.50)$$

$$Z_T = 3 \cdot \frac{u_K}{100} \frac{U_\phi^2}{S_{T_НОМ}}, \quad (2.51)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - r_T^2}, \quad (2.52)$$

$$L_T = \frac{X_T}{2\pi f}, \quad (2.53)$$

де P_K - втрати потужності при к.з., *Вт*;

$S_{T_НОМ}$ - номінальна потужність трансформатора, *ВА*;

u_K - напруга к.з., приведене до відповідної обмотки, %; U_ϕ - фазна напруга на відповідній обмотці, *В*.

Блок « 3 Level IGBTs Bridge» - блок трифазного інвертора, виконаного на основі IGBT-модулів.

Блок « PV Array» - блок сонячної панелі.

Блок « Temperature» - блок датчика температури. Блок « Irradiance» - блок датчика сонячної активності.

Вимірювання в даній схемі виконують за допомогою блоків «Pac, Pdc», що вимірюють фазні струми та напруги, та параметри навколишнього середовища.

Для покращення якості електроенергії в мережі змодельємо СЕС як фільтр від гармонік. Блок схему моделі (див. рис. 2.43) та Блок Grid в розгорнутому вигляді (рис.2.44), Блок SES в розгорнутому вигляді (рис.2.45).

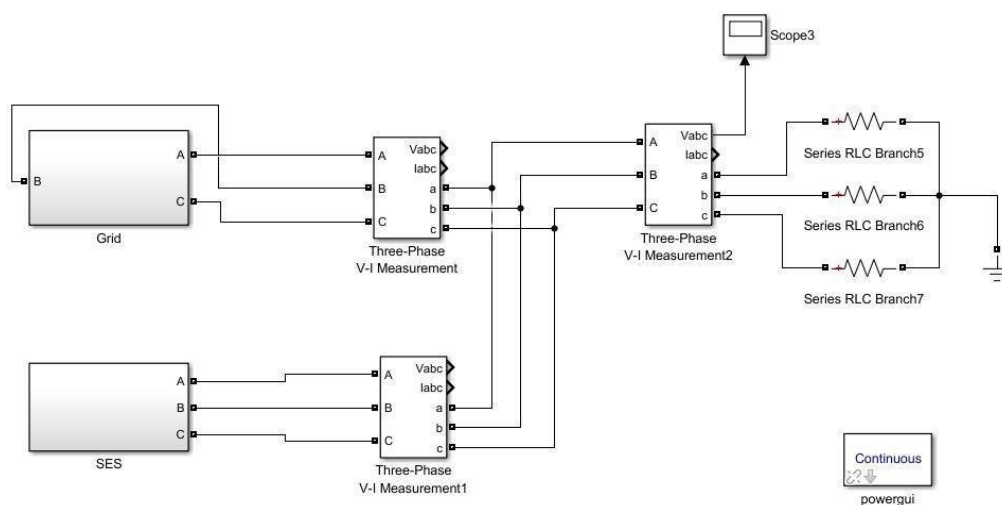


Рисунок 2.43 – Блок схема моделі СЕС для мережі як активний фільтр.

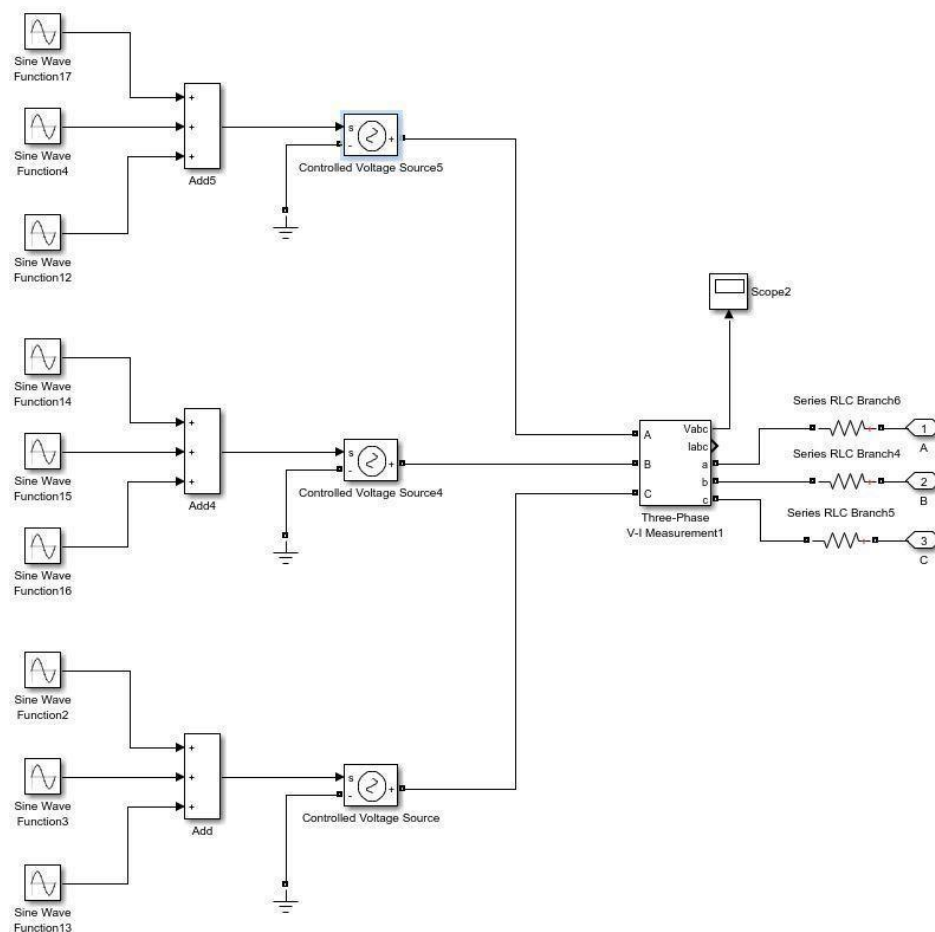


Рисунок 2.44 – Блок Grid в розгорнутому вигляді.

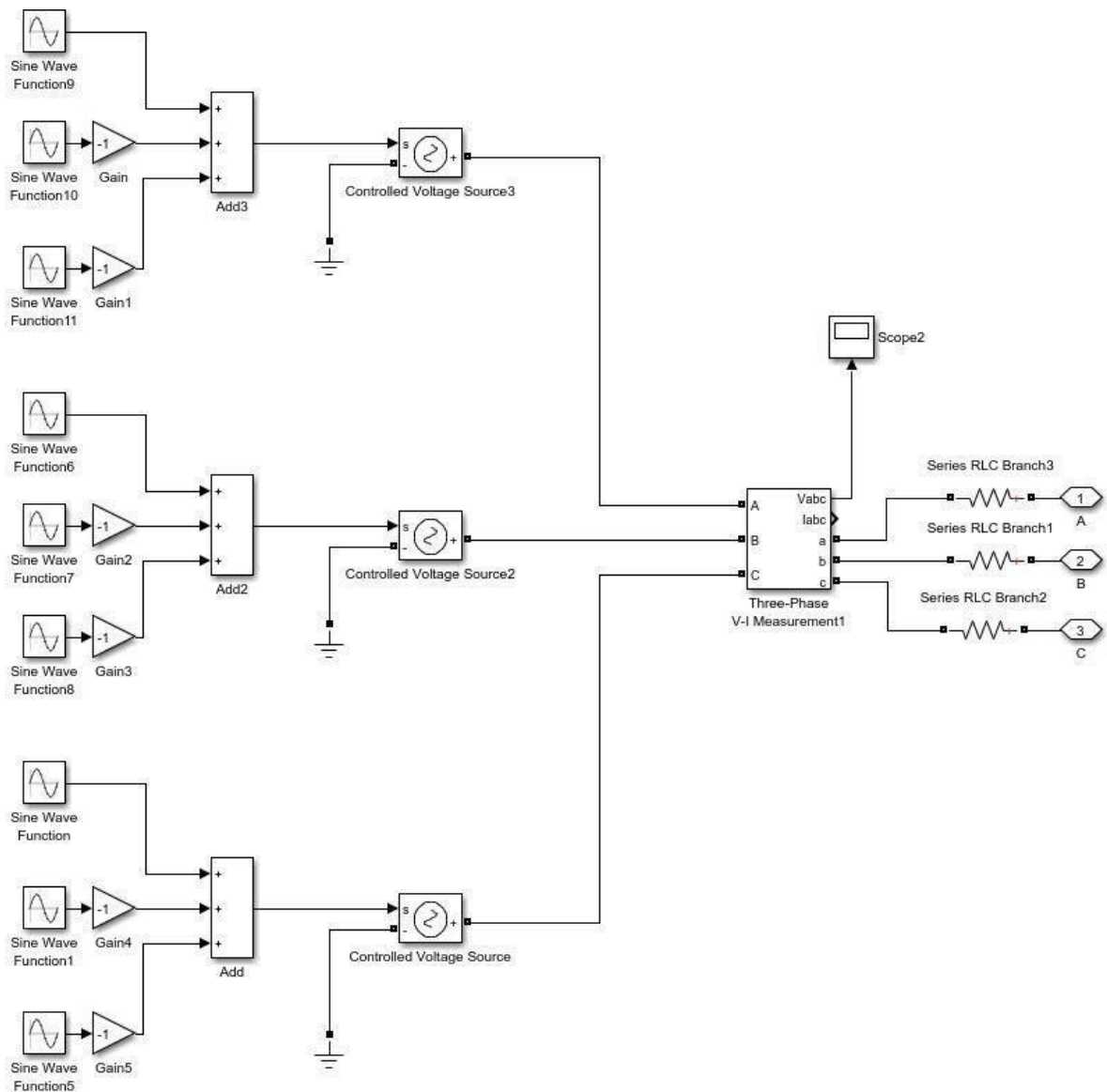


Рисунок 2.45 – Блок SES в розгорнутому вигляді

Силкові активні фільтри компенсують гармоніки струму шляхом введення рівного, але протилежного гармонійному, струму компенсації. У цьому випадку силовий активний фільтр діє як джерело струму, що вводить гармоніки, які генеруються навантаженням, але із зсувом по фазі на 180° . В результаті компоненти гармонійних струмів, що містяться в струмі навантаження

придушуються під дією активного фільтру і струм джерела залишається синусоїдальним і у фазі з відповідною фазною напругою.

2.5.2 Розрахунок силового активного фільтру

Силові активні фільтри компенсують гармоніки струму шляхом введення рівного, але протилежного гармонійному, струму компенсації. У цьому випадку силовий активний фільтр діє як джерело струму, що вводить гармоніки, які генеруються навантаженням, але із зсувом по фазі на 180° . В результаті компоненти гармонійних струмів, що містяться в струмі навантаження придушуються під дією активного фільтру і струм джерела залишається синусоїдальним і у фазі з відповідною фазною напругою. Цей принцип можна застосувати до будь-якого типу навантаження. Таким чином, система розподілу електроенергії сприймає нелінійне навантаження і активний фільтр як ідеальний резистор [15]. Принципова схема роботи силового активного фільтру показана на рис.2.46

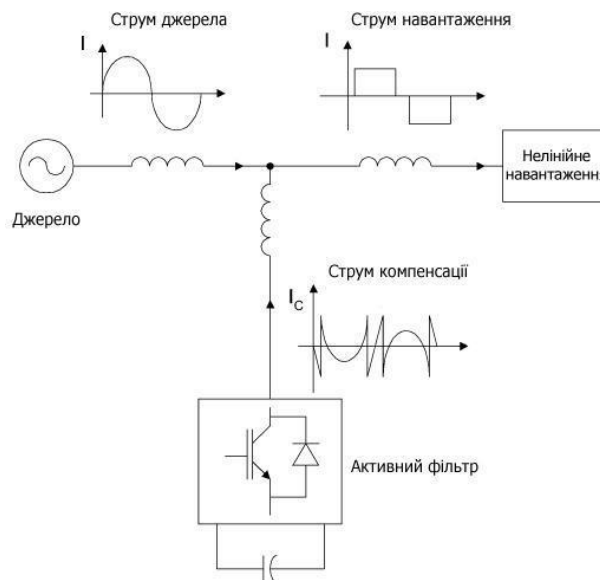


Рисунок 2.46 - Принципова схема роботи силового активного фільтру.

2.5.3 Система управління

Схема управління силовим активним фільтром повинна розраховувати форму хвилі опорного струму для кожної фази інвертора, підтримувати постійну напругу на певному рівні і генерувати сигнали управління. Блок-схема системи управління силовим активним фільтром показана на рис. 2.47.

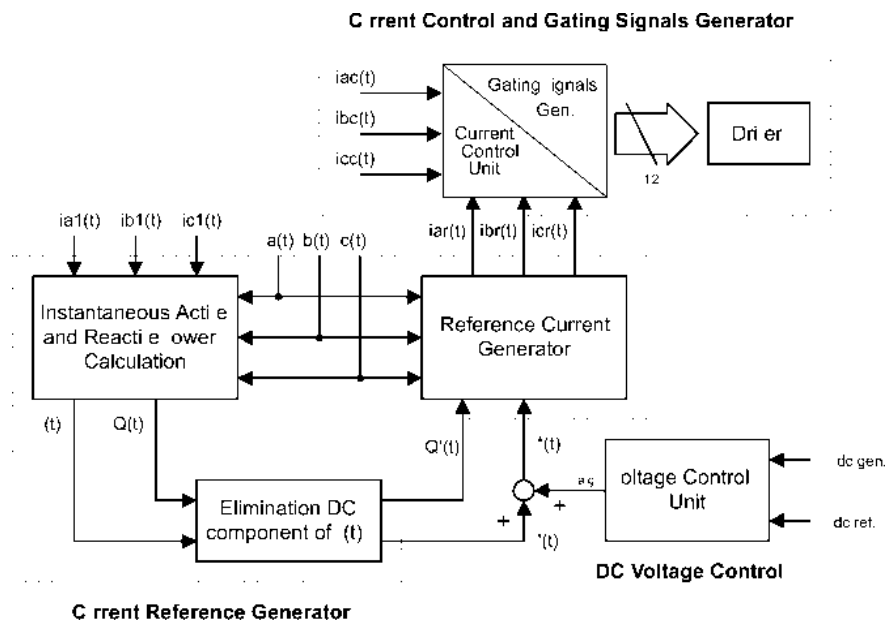


Рисунок 2.47 – Блок-схема системи управління силовим активним фільтром.

Згенерований опорний струм потрібен для компенсації гармонійного струму навантаження, а також для підтримки постійної напруги на конденсаторі. Ефективність активного фільтра залежить від його здатності слідувати з мінімальною похибкою і затримкою часу опорного струму.

Є багато можливостей для визначення опорного струму, необхідного для компенсації нелінійних навантажень. Як правило, активні фільтри використовуються для компенсації реактивної потужності та гармонійного струму низької частоти, що генерується нелінійними навантаженнями. Однією з альтернатив для визначення опорного струму інвертора є використання теорії миттєвої реактивної потужності, запропонованої Акаджі. Ця концепція дуже

популярна і корисна, і в основному складається із переходу від системи відліку a, b, c до миттєвої потужності, напруги і струму сигналів α і β (рис. 2.48).

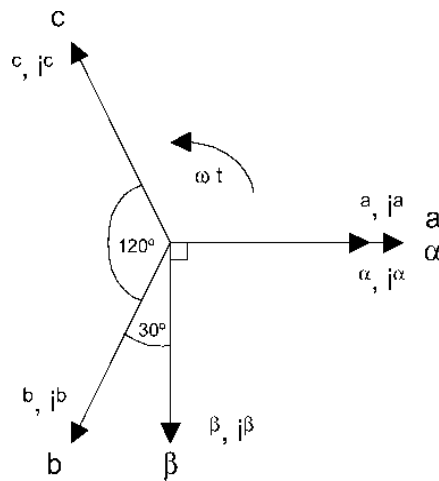


Рисунок 2.48 – Векторна діаграма переходу від системивідліку a, b, c до α, β координат

Миттєві значення напруги і струму в α, β координатах можуть бути отримані з наступних рівнянь:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = [A] \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = [A] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad (2.54)$$

де $u_a, u_b, u_c, i_a, i_b, i_c$ - відповідно миттєві значення напруг і струмів;

A - матриця перетворення, що визначається з векторної діаграми переходувід системи.

Ця трансформація має місце тоді і тільки тоді, коли $u_a(t) + u_b(t) + u_c(t) = 0$, а також, якщо напруги збалансовані і синусоїдальні.

Миттєві активна і реактивна потужності в α , β координатах обчислюються за наступними виразами:

$$p(t) = u_{\alpha}(t) \cdot i_{\alpha}(t) + u_{\beta}(t) \cdot i_{\beta}(t), \quad (2.55)$$

$$q(t) = -u_{\alpha}(t) \cdot i_{\beta}(t) + u_{\beta}(t) \cdot i_{\alpha}(t), \quad (2.56)$$

де $u_{\alpha}(t), u_{\beta}(t)$ - миттєві значення напруги у α , β координатах; $i_{\alpha}(t), i_{\beta}(t)$ - миттєві значення струму у α , β координатах.

Очевидно, що $p(t)$ стає рівною звичайної миттєвій активній потужності, визначеній в а, б, с відліку. Тим не менше, для того, щоб визначити миттєву реактивну потужність, Акаджі вводить новий миттєвий векторний простір який визначається виразом (2.55) або векторним рівнянням:

$$q = u_{\alpha} \cdot i_{\beta} + u_{\beta} \cdot i_{\alpha}, \quad (2.57)$$

Вектор q перпендикулярний до площини α , β координат, з якими зустрінеться у відповідності з правилом правої руки, та u_{α} перпендикулярна i_{β} , а u_{β} перпендикулярна i_{α} . Фізичним змістом вектора q не буде "миттєва потужність", оскільки добутком є напруга однієї фази і струм іншої фази. І

навпаки, $u_{\alpha}i_{\alpha}$ і $u_{\beta}i_{\beta}$ в рівнянні (2.54), очевидно, означають "миттєву потужність", оскільки добутком є напруга і струм однієї фази. Акаджі називає

нову електричну величину, визначену в (2.56) "миттєва уявна потужність", яка представлена як добуток миттєвої напруги та струму.

Вираз струмів в α , β площині, залежно від миттєвої потужності задається наступним рівнянням:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix}. \quad (2.58)$$

Різні компоненти струмів в α , β площині показані в наступних виразах:

$$i_{\alpha p} = \frac{u_{\alpha} p}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2}, \quad (2.59)$$

$$i_{\alpha q} = \frac{u_{\beta} q}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2}, \quad (2.60)$$

$$i_{\beta p} = \frac{u_{\beta} p}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2}, \quad (2.61)$$

$$i_{\beta q} = \frac{-u_{\alpha} q}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2}, \quad (2.62)$$

де $i_{\alpha p}, i_{\beta p}, i_{\alpha q}, i_{\beta q}$ - відповідно значення активних і реактивних складових струмів у α , β площині.

З рівнянь (2.54) і (2.55), значення p і q можна виразити через постійні компоненти плюс компоненти змінних складових, а саме:

$$p = \bar{p} + \tilde{p}, \quad (2.63)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}, \quad (2.64)$$

\bar{p} - постійна складова миттєвої потужності p і пов'язана зі звичайним фундаментальним активним струмом;

\tilde{p} - змінна складова миттєвої потужності p , вона не має середнього значення, і пов'язана з гармонійними струмами, що викликані змінною складовою миттєвої активної потужності;

\bar{q} - постійна складова уявної миттєвої потужності q , і пов'язана з реактивною потужністю, викликана фундаментальними компонентами напруг і струмів;

\tilde{q} - змінна складова уявної миттєвої потужності q , і пов'язана з гармонійними струмами, що викликані змінною складовою миттєвої реактивної потужності.

Для компенсації гармонік, що генеруються нелінійним навантаженням, опорний сигнал силового активного фільтра повинен включати в себе значення \tilde{p} , \bar{q} , і \tilde{q} . У цьому випадку опорний струм, необхідний для фільтра розраховується за наступним виразом:

$$\begin{bmatrix} i_{c,\alpha}^* \\ i_{c,\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix}, \quad (2.65)$$

Результуючі компенсуючі струми, включаючи струми нульової послідовності розраховуються за наступною формулою:

$$\begin{bmatrix} i_{c,a}^* \\ i_{c,b}^* \\ i_{c,c}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_0 \\ i_{c,\alpha}^* \\ i_{c,\beta}^* \end{bmatrix}, \quad (2.66)$$

де i_0 - струм нульової послідовності дорівнює $1/\sqrt{3} \cdot (i_a + i_b + i_c)$, А.

Блоки, необхідні для створення опорного струму визначеного у (2.67) показані на рис.2.49.

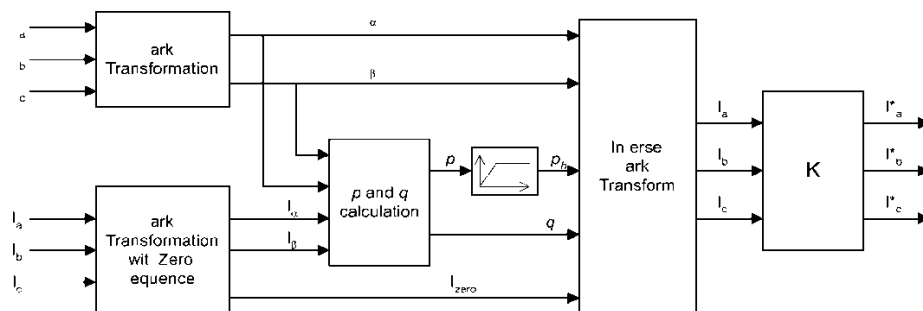


Рисунок 2.49 - Блок-схема генерації опорного струму за допомогою p-q теорії. Перевагою p-q теорії є те, що активна і реактивна потужності, пов'язані з

основними компонентами в постійних кількостях. Ці величини можуть бути вилучені за допомогою фільтра низьких частот. Оскільки сигнал для вилучення є постійним, то його фільтрація в α , β координатах нечутлива до помилок зсуву фази, внесених фільтром нижніх частот, що поліпшує компенсаційні характеристики активного фільтру.

Ефективність активного фільтра залежить в основному від конструктивних характеристик регулятора струму. Велика частина технічних питань модуляції, що використовується в активних фільтрах залежить від стратегії ШІМ.

Трикутний метод, показаний на рис. 2.50 порівняння поточної помилки з фіксованою амплітудою і фіксованою частотою трикутної хвилі. Помилка обробляється за допомогою пропорційно-інтегрального (PI) каскаду посилення перед порівнянням з трикутним імпульсом [15].

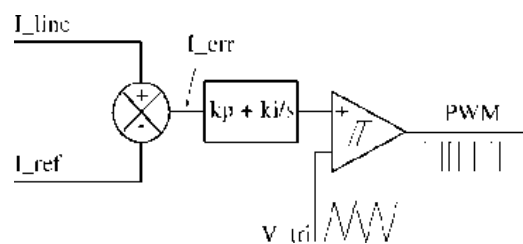


Рисунок 2.50 – Трикутний метод ШІМ

2.5.4 Розрахунок конденсатора

Перехідні зміни миттєвої потужності, що споживається навантаженням генерують коливання напруги на конденсаторі. Амплітудою цих коливань напруги можна ефективно керувати за допомогою відповідного значення ємності конденсатора. Необхідно відзначити, що контроль напруги петлі постійного струму стабілізує напругу на конденсаторі після декількох циклів, але не досить швидко, щоб обмежити перші варіації напруги. Значення ємності конденсатора, отримане за цим критерієм більше, ніж значення, отримане на основі максимального обмеження пульсації напруги постійного струму. З цієї причини напруга на конденсаторі являє менший коефіцієнт нелінійних викривлень. Ємність конденсатора розраховується за наступною формулою:

$$C = \frac{1}{\Delta U} \int_{t_1}^{t_2} i_C(t) dt, \quad (2.68)$$

де ΔU - коливання напруги на конденсаторі, В (приймаємо 0,01 В); $i_C(t)$ - миттєве значення постійного струму, А;

t_1, t_2 - відповідно час початку і кінця інтегрування, с; ω - кутова частота, с⁻¹.

Рівняння (2.68) визначає значення ємності конденсатора, яка буде

підтримувати коливання напруги постійного струму нижче ΔU . Середнє

значення постійного струму, який створює максимальне перенапруження може бути визначене:

$$\int_{t_1}^{t_2} i_C(t) dt = I_{inv} \int_{t_1}^{t_2} [\sin(\omega t) + \sin(\omega t + 120^\circ)] dt, \quad (2.69)$$

де I_{inv} - струм інвертора, А.

Розраховуємо миттєве значення струму конденсатора для канонічної гармоніки найбільшої величини.

На основі вищевикладеного і проведеного розрахунку була побудована модель паралельного силового активного фільтру, представлена на рис. 2.51.

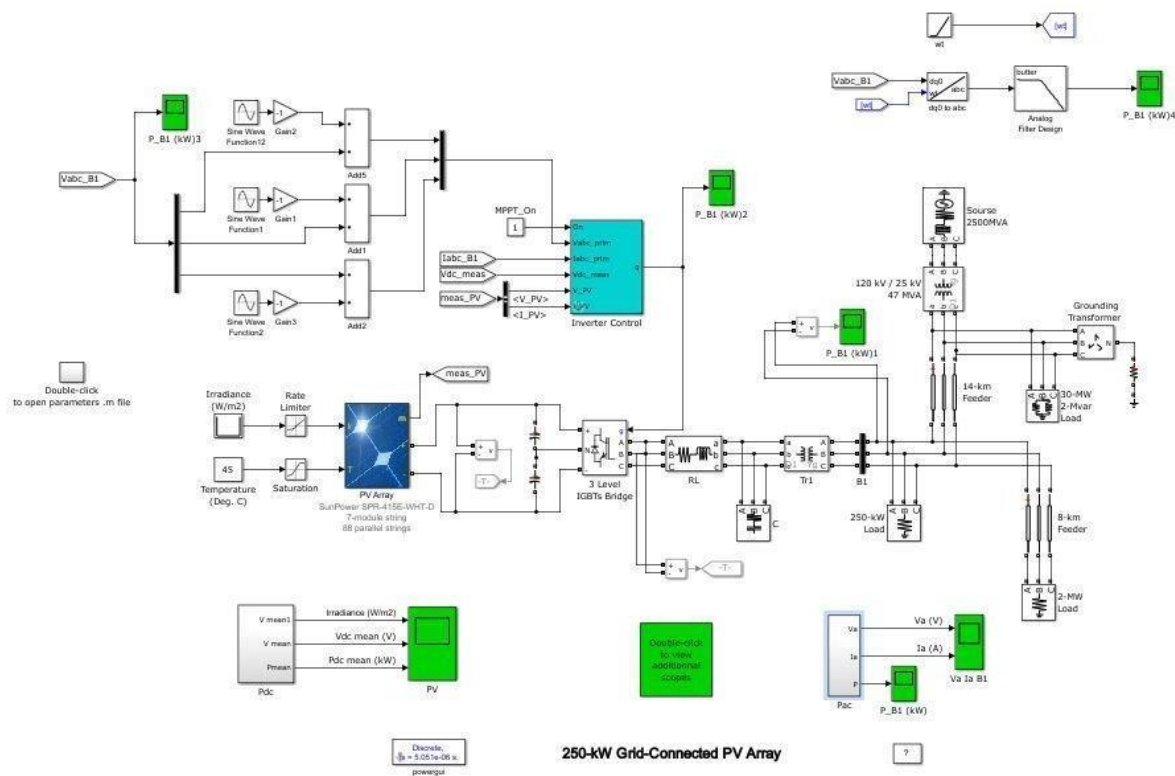


Рисунок 2.51 Модель паралельного силового активного фільтру

2.6 Результати моделювання

Були перевірені наступні режими роботи:

- підтримання напруги в режимі веденого;
- підтримання напруги в режимі ведучого;
- підтримання напруги з переходом з веденого в провідний;
- як активний фільтр.

Для деяких режимів були проведені незначні зміни моделі. Всі зміни стосувалися блоку «Керування інвертором».

2.6.1 Підтримка напруги в режимі веденого

Задіємо зворотні зв'язки по струму і напрузі (рис 2.52).

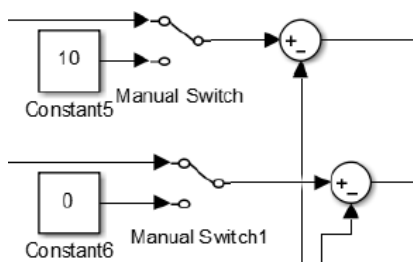


Рисунок 2.52 - Замкнутий контур струму

У момент часу $T = 0.05$ змінимо опір на навантаженні. Результат наведений на рис.2.53 та рис.2.54.

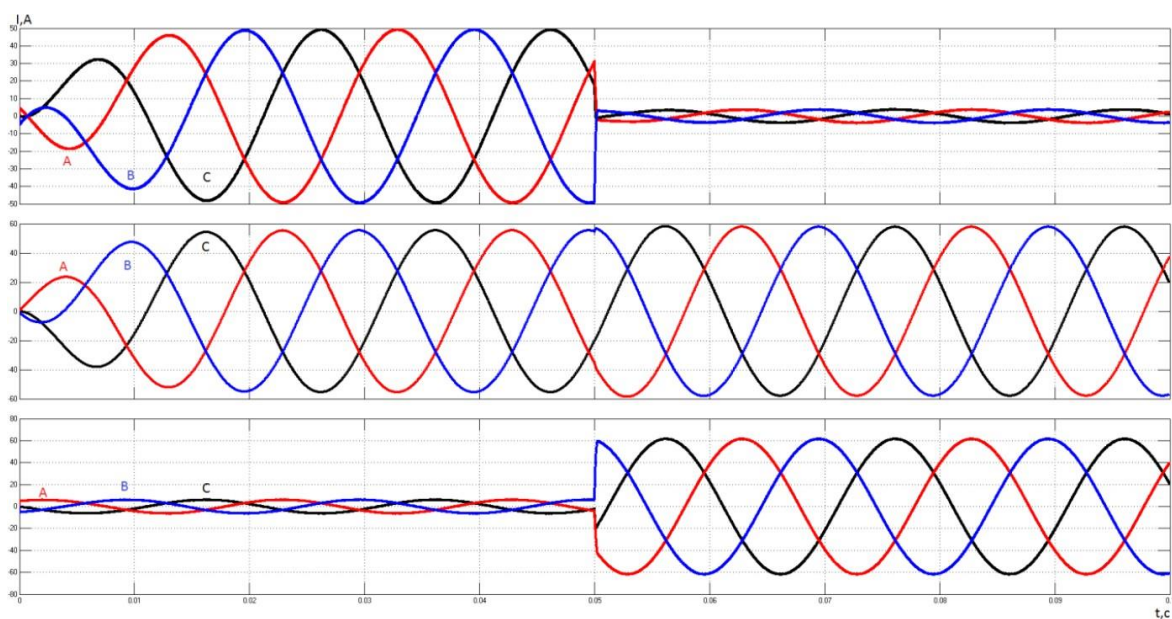


Рисунок 2.53 - Струм інвертора, генератора і навантаження.

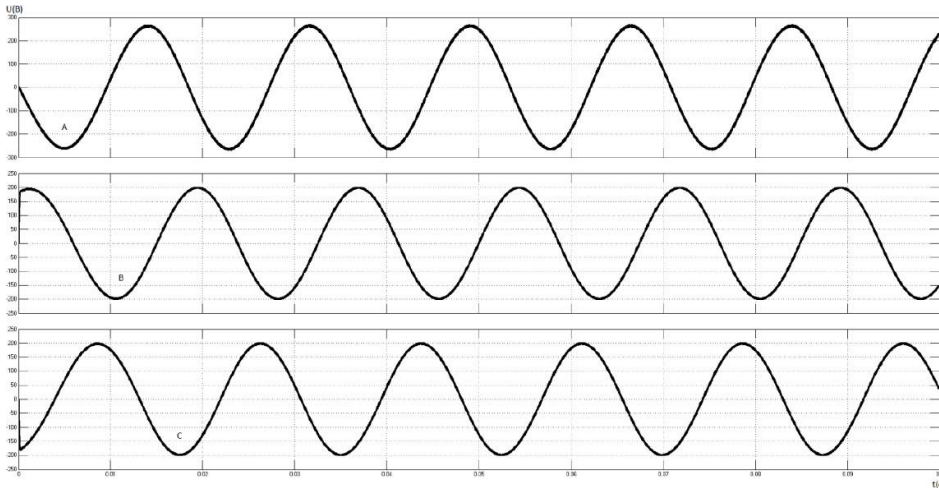


Рисунок 2.54 - Напряга на навантаженні.

2.6.2 Підтримка напруги в режимі ведучого

Перехід з режиму веденого в режим ведучого повинен проводитися по зовнішньому сигналу з верхнього рівня управління.

У даній моделі імітація сигналів була здійснена перемикуванням з 0 на 1 для кожного режиму (рис.2.55).

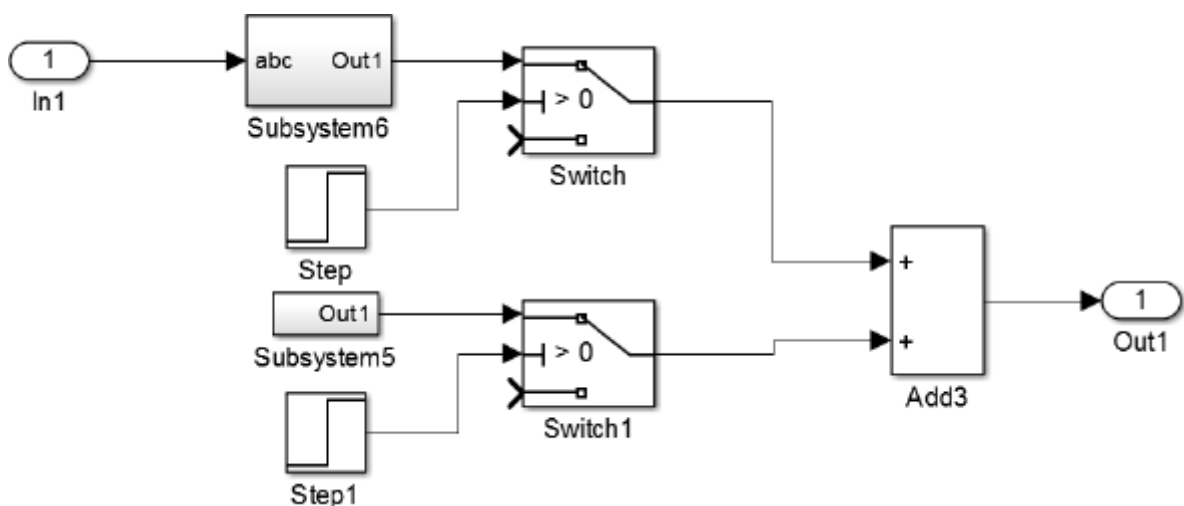


Рисунок 2.55 - Блок вибору режиму роботи.

Саме в даному досліді для здійснення роботи інвертора тільки в режимі ведучого ніяких перемикачів не проводилося. Для режиму веденого постійно подавався 0, а для режиму ведучого постійно подавалася 1.

Нижче представлені (рис. 2.56 та рис. 2.57) значення струмів інвертора і навантаження. Генератор був від'єднаний від навантаження, тому ніяких струмів в мережу не віддавав.

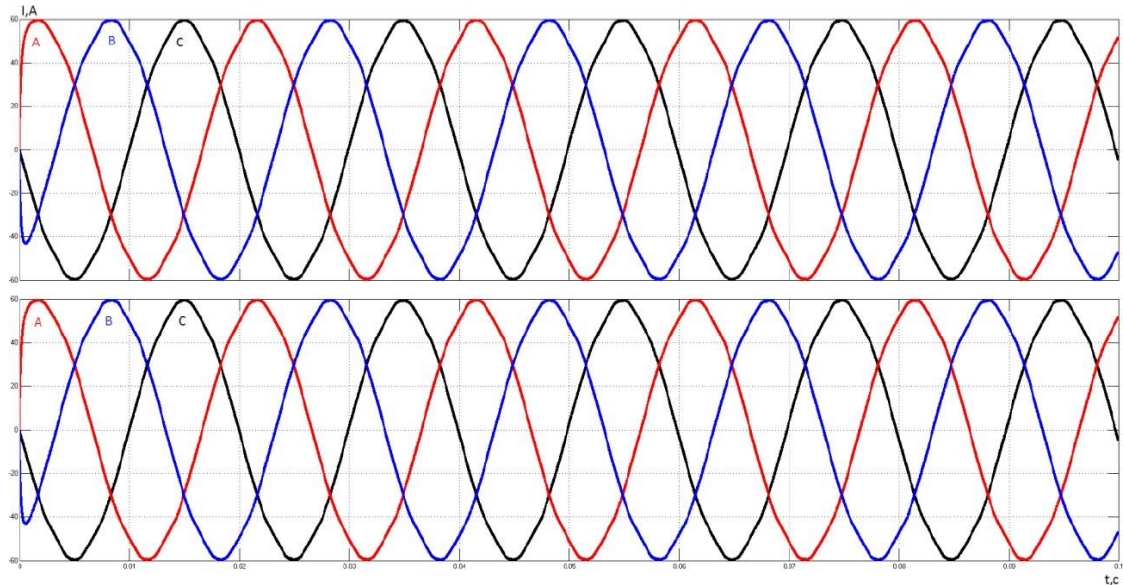


Рисунок 2.56 - Струми інвертора і навантаження.

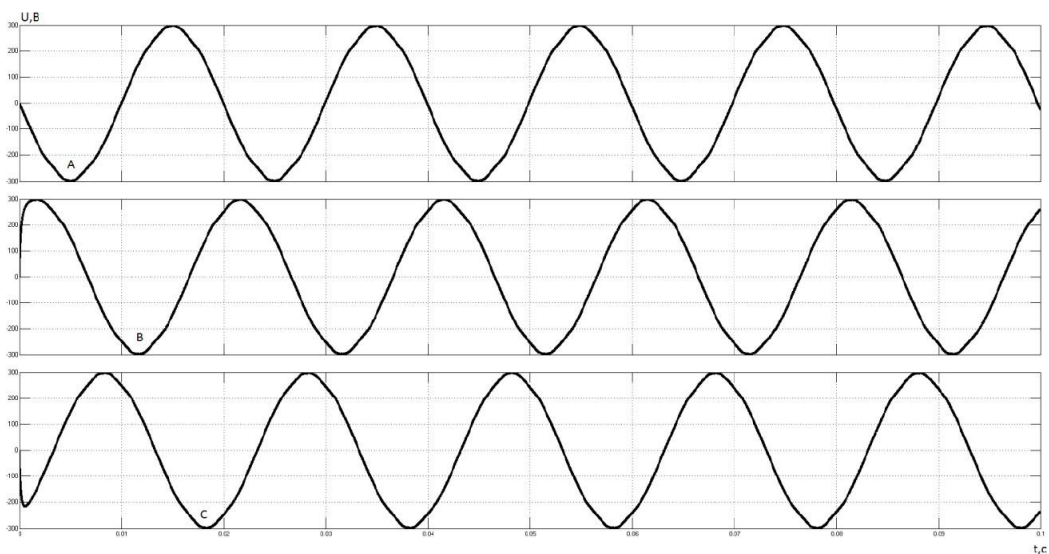


Рисунок 2.57 - Напруга на навантаженні.

2.6.3 Підтримка напруги з переходом з режиму ведучого в режим веденого

Трохи модифікувавши блок, який здійснює синхронізацію з мережею і завдання кута для формування синусів струму, створимо умови для перемикання інвертора в режим ведучого в середині моделювання, тобто в момент часу 0.05 с.

Також встановимо на виході генератора Three-Phase Breaker, який би спрацьовував при $t = 0.05$ с. Параметри Three-Phase Breaker представлені на рис.2.58.

The image shows a configuration window for a 'Three-Phase Breaker'. The window title is 'Three-Phase Breaker (mask) (link)'. Below the title is a description: 'Implements a three-phase circuit breaker. When the external switching time mode is selected, a Simulink logical signal is used to control the breaker operation.' The 'Parameters' section includes: 'Initial status: closed' (dropdown menu); 'Switching of:' with three checked checkboxes for 'Phase A', 'Phase B', and 'Phase C'; 'Switching times (s): [1/60 5/60]' (text input) and a checked 'External' checkbox; 'Breaker resistance Ron (Ohm): 0.01' (text input); 'Snubber resistance Rs (Ohm): 500' (text input); 'Snubber capacitance Cs (F): inf' (text input); and 'Measurements: None' (dropdown menu).

Рисунок 2.58 - Параметри вимикача.

У блоці для синхронізації і завдання кутів встановимо осцилограф Scope3 (рис. 2.59). Осцилограф дозволить нам спостерігати за режимами роботи.

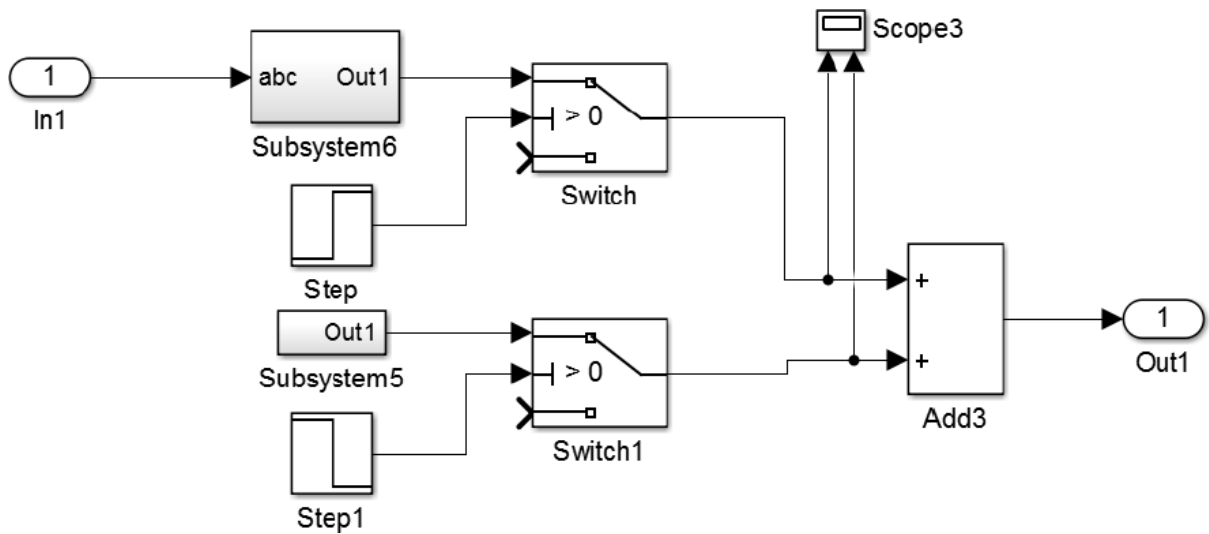


Рисунок 2.59 - Блок вибору режиму роботи.

У режимі веденого мережею на другому каналі осцилографа ми повинні спостерігати 0, а в режимі ведучого значення від 0 до 2π . У режимі ведучого все повинно бути навпаки.

Розглянемо графіки струмів інвертора, генератора і навантаження (рис.2.60).

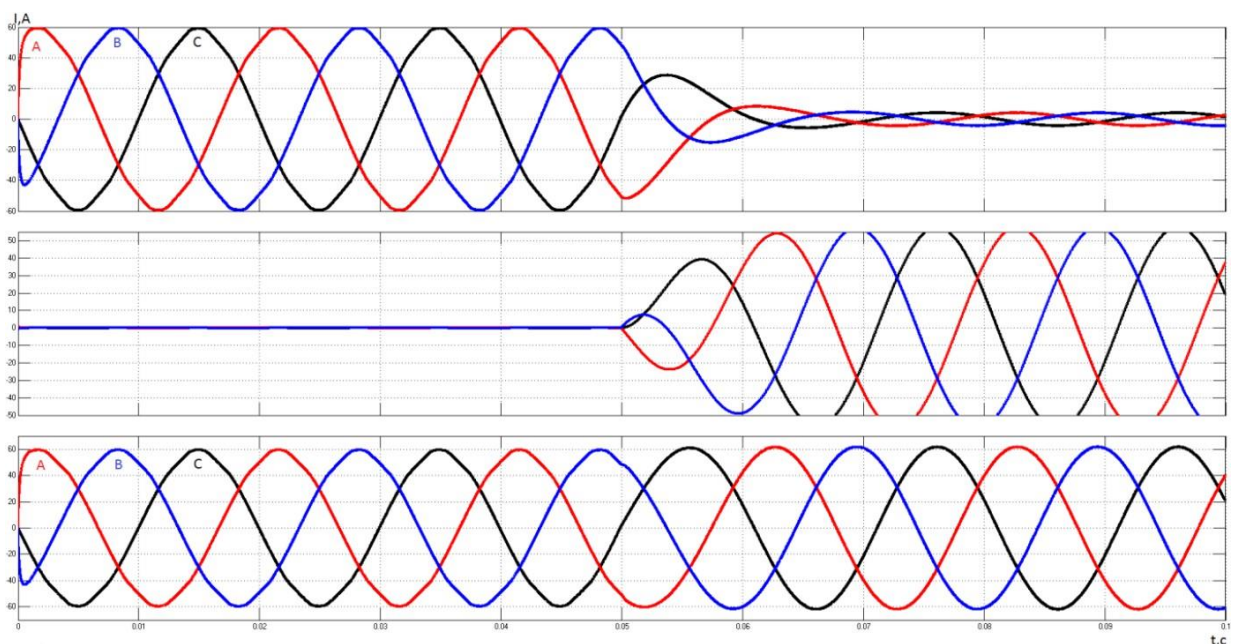


Рисунок 2.60 - Струми інвертора, генератора і навантаження.

До 0.05с генератор не віддавав енергію в мережу, і інвертор працював в режимі ведучого. При включенні генератора інвертор зменшив віддаються струми і переключився в режим веденого, про що свідчать дані з осцилографа Scope3 (рис.2.61).

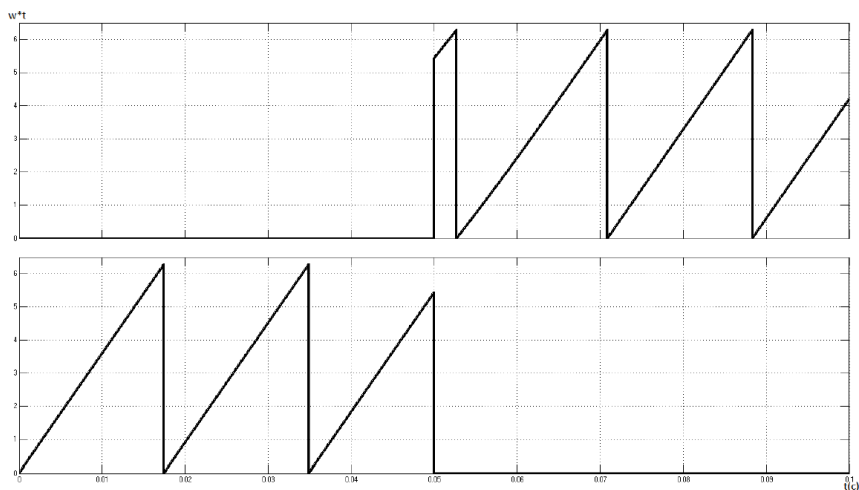


Рисунок 2.61 - Завдання кутів режиму ведучого і веденого.

Ніяких просядок по напрузі на навантаженні в момент перемикавання неспостерігалось (рис.2.62).

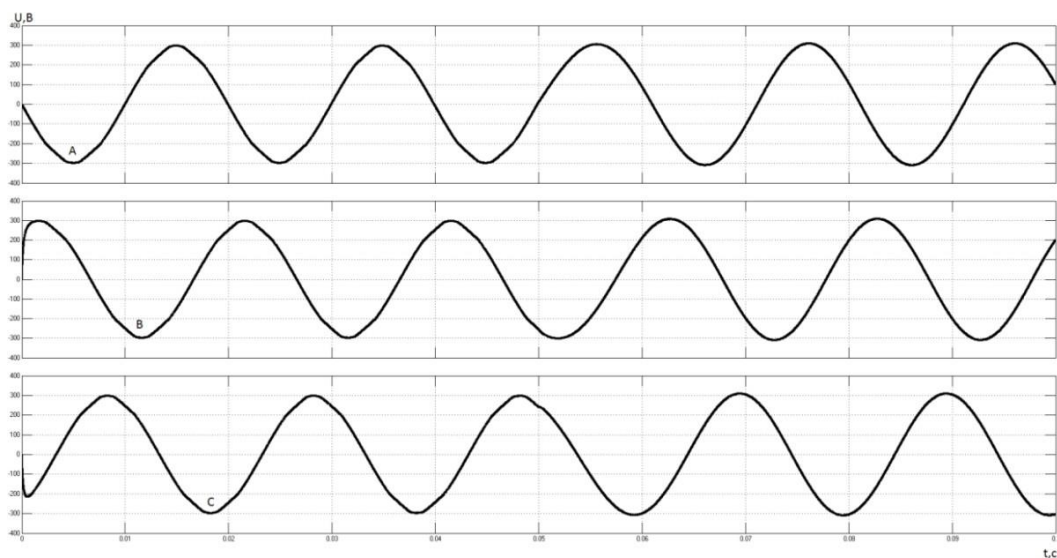


Рисунок 2.62 - Напруга на навантаженні.

2.6.4 Результати моделювання і порівняльний аналіз технічних засобів по покращенню якості електроенергії

Проаналізуємо результати з блок схеми моделі СЕС для мережі яка активний фільтр представлений на рис. 2.63.

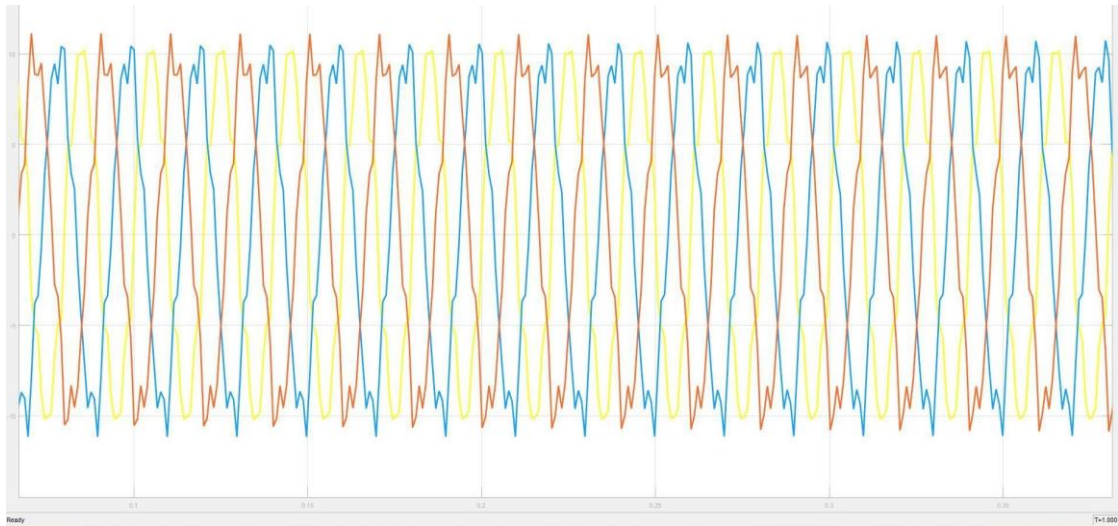


Рисунок 2.63 - Несинусоїдальність, що відбувається в мережі

Після введення на СЕС рівного, але протилежного гармонійному, струму компенсації отримали результат, що представлений на рис. 2.64.

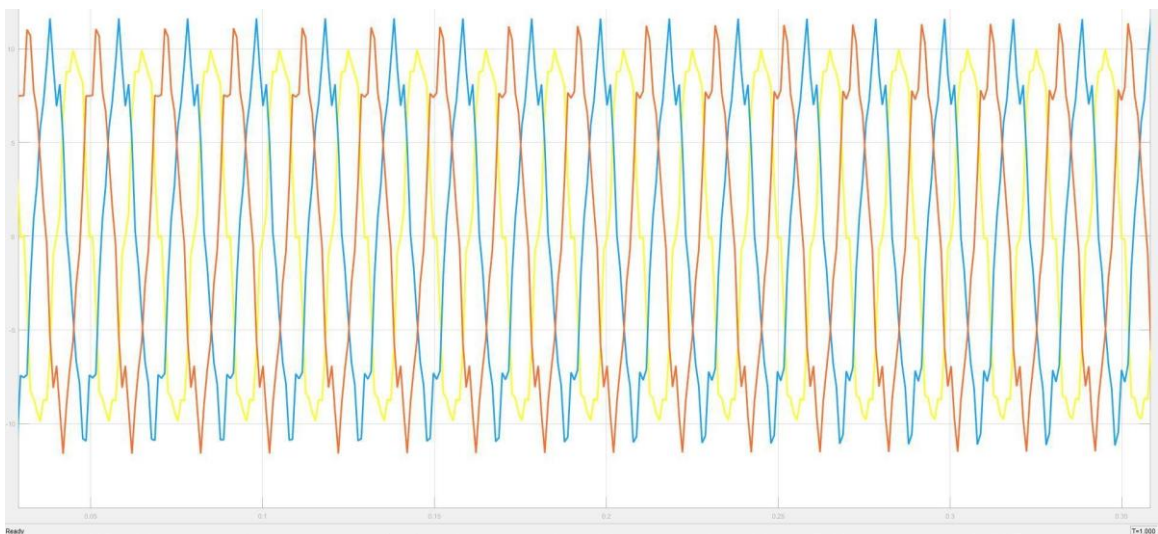


Рисунок 2.64 - Навантаження на СЕС, що генеруються із зсувом по фази на 180

В результаті компоненти гармонійних струмів, що містяться в струмі навантаження придушуються під дією активного фільтру і струм джерела залишається синусоїдальним і у фазі з відповідною фазною напругою (рис.2.65).

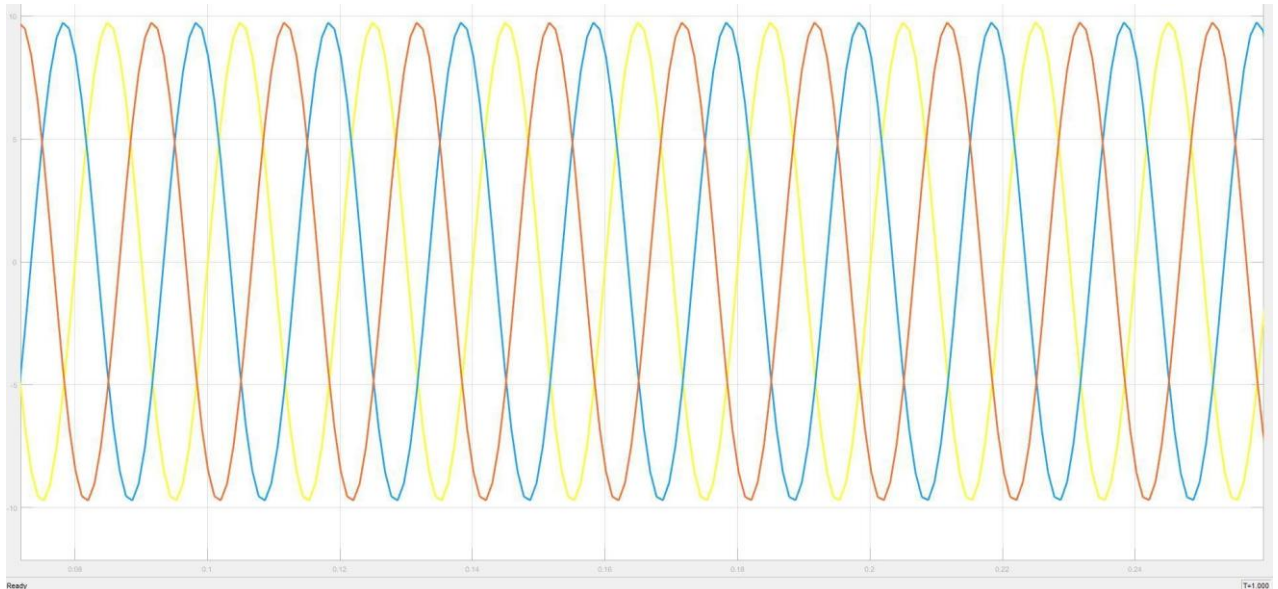


Рисунок 2.65 – Навантаження у споживача

Об'єднавши модель СЕС та блок схеми впровадження активного фільтру було отримано осцилограми струмів і спектральний склад гармонік до і після впровадження фільтру.

На рис.2.66 зображено струм однієї фази, який споживає нелінійне навантаження, і його гармонійний спектр до підключення фільтру.

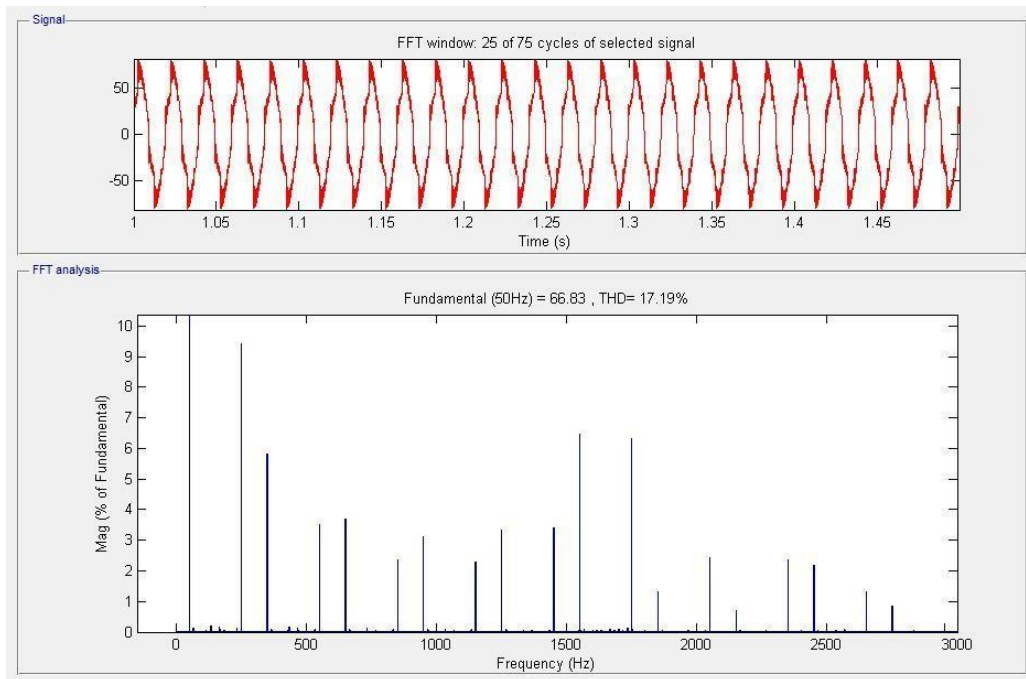


Рисунок 2.66 – Струм навантаження і спектр гармонік однієї з фаз до впровадження САФ

Частотний аналіз (FFT Analysis) струму показав, що коефіцієнт несинусоїдальності (THD) до підключення фільтру на навантаженні складає 17.19%, що виходить за гранично допустиме значення (12 %). Із спектру гармонік бачимо, що в кривій струму переважають гармоніки з частотами 250, 350, 550, 650, 850, 950 і т.д. Гц, що зумовлено характером нелінійного навантаження.

Як видно з рис. 2.67 частотний аналіз (FFT Analysis) струму показує, що коефіцієнт несинусоїдальності (THD) після підключення фільтру в мережі складає 2.54%, що не виходить за нормально допустиме значення (5%). Із спектру гармонік бачимо, що вищенаведені гармоніки були придушені.

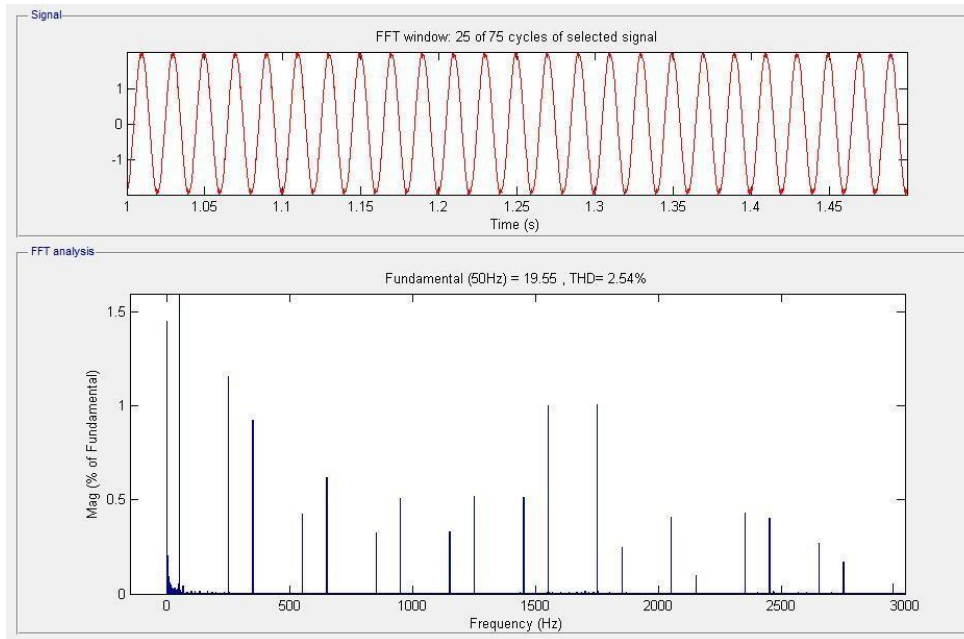


Рисунок 2.67 – Струм мережі і спектр гармонік однієї з фаз після впровадження САФ.

Застосування силового активного фільтру електроенергії дозволяє досягти значного покращення електромагнітної сумісності нелінійного споживача з живлячою мережею, що відображається на якості електроенергії і нормальному безаварійному режимі роботи енергосистеми в цілому.

РОЗДІЛ 3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Сонячна енергетика - одна з найперспективніших галузей відновлюваної (нетрадиційної) енергії. Про це свідчать високі темпи її розвитку як в Україні, так і у цілому світі.

В сучасних електричних мережах є проблеми з підвищеною втратою електроенергії за рахунок використання напівпровідникових приладів, які в свою чергу викликають появлення вищих гармонік.

В кваліфікаційній роботі було досліджено режими роботи напівпровідникового приладу – інвертора і як він впливає на показники якості електричної енергії. Результати показали, що при підключенні СЕС до мережі спостерігається несинусоїдальність напруги, що погіршує якість електроенергії у споживачів.

У розвитку науки і техніки, створенні новітніх технологій, підвищення енергетичної безпеки України, суттєва роль тут належить надійної і якісної поставки електричної енергії (ЕЕ) споживачам. В Україні почала функціонувати нова модель ринку ЕЕ, що представляє собою ринок двосторонніх договорів і балансуєчий ринок (ДДБР). Одним із завдань нової моделі ринку є створення ринку функціонуючого для забезпечення стабільної та надійної роботи об'єднаної енергосистеми України, передачі і постачання ЕЕ належної якості [16].

Розглянемо економічну оцінку наслідків низької якості електричної енергії. Для здійснення заходів з підтримки якості енергії промислові підприємства змушені витратити значні матеріальні і грошові кошти. У зв'язку з цим важливим є техніко-економічне обґрунтування виділення таких коштів і, в першу чергу, визначення величини економічного збитку, що виникає від низької якості електроенергії.

В умовах ринкової економіки мережеве підприємство і споживач виступають, як рівні партнери, суб'єкти єдиного процесу розподілу і споживання ЕЕ [17].

Зміна ставлення до проблем ЯЕ як з боку енергопостачальних компаній, так і з боку електроспоживачів обумовлено перш за все тим, що при використанні ЕЕ низької якості підприємством і самої енергосистемою несуться втрати.

До проблеми енерго - і ресурсозбереження насамперед відноситься підвищення надійності електропостачання, так як раптове припинення харчування може привести до великих збитків у виробництві.

Іншою проблемою, що стала особливо актуальною в зв'язку з широким застосуванням перетворень на СЕС, підключених до систем електропостачання, є забезпечення необхідної якості електроенергії. Низька якість електроенергії призводить до збільшення втрат електроенергії як в електроприймачах, так і в мережі.

Економічні збитки формуються під впливом трьох елементів:

- впливу;
- сприйняття;
- стану (відображає рівень нормативних економічних показників, що переводять натуральні показники в вартісні).

До елементу впливу в загальному випадку може бути віднесений обсяг втрачаються ресурсів (сировини, матеріалів, енергії, продукції, робочої сили, обладнання). Ця обставина робить актуальною диференціацію шкоди на складові, що враховують втрату певного виду ресурсів: від простою, невиробничого витрати або перевитрати робочої сили.

Фактори сприйняття є об'єктами, які потрапляють в зону збитків і сприймають його негативний вплив: елементи комунального господарства, елементи енергосистеми, основні фонди промисловості, транспорту, зв'язку.

До факторів стану відносяться економічні показники, які служать для перекладу величини збитку в вартості оцінки (наприклад, вартість різних робіт з утримання житлово-комунального господарства та міського громадського транспорту, необхідних для проживання 1 тис. Осіб; вартість 1 кВт-год недовідпущеної електроенергії; вартість 1 кВт-год встановленої потужності, вартість на 1 кВт).

Зазначені фактори при формуванні сумарного збитку виступають в нерозривному зв'язку, тобто про економічний збиток можна говорити тільки при наявності всіх трьох груп факторів.

Сумарну величину економічного збитку від зниження КЕ поділяють на дві складові: електромагнітну (що включає в себе збитки від зміни споживання активної та реактивної енергії і втрат активної потужності) і технологічну (в яку входять збитки від зміни продуктивності, браку продукції і зміни терміну служби установок, згідно експертними оцінками значення технологічного збитку на порядок вище електромагнітного) [18].

Коректна оцінка структури збитку вимагає точного фіксування, щодо яких саме явищ і подій та з урахуванням яких чинників він визначається.

Аналіз методичної бази щодо визначення шкоди дозволяє зробити наступний висновок за влучним висловом шкоди:

1. Економічні збитки від зниження якості електроенергії не має поки чіткого визначення не тільки в плані методів кількісного виміру, а й на змістовному рівні. Тому необхідне вироблення змістовного поняття збитку і його складових.

2. Економічні збитки - величина комплексна, до складу якої слід включати всі ті витрати електроенергетичних систем і промислових підприємств - споживачів енергії, викликані фактом порушення надійності електропостачання, які не відшкодовуються випуском продукції і отриманим прибутком.

3. Завдані збитки повинен бути прямим, безпосереднім і піддаватися вимірюванню.

4. Збиток як такої - величина детермінована. Методологія формування збитку вимагає чіткого формулювання: по відношенню до якого саме події чи явища він визначається, так як це впливає на склад входять до нього втрат і витрат.

5. Існуючі методики, що визначають економічний збиток, не задовольняють вимогам сучасного виробництва і умов ринкової економіки. У зв'язку з цим виникає необхідність створення методики економічної оцінки збитку, викликаного низькою якістю електроенергії та перервами в електропостачанні споживачів окремого регіону або області, а також методів оцінки прямого, непрямого і вторинного збитку від низької якості електропостачання різних категорій споживачів.

Для точного визначення наявності складових збитку від неякісної електроенергії в даній роботі недостатньо вихідної інформації. Економічну ефективність можливо визначити при наявності вихідних даних.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В ході виконаних експериментів було встановлено, що якщо СЕС працюватиме в автономному режимі створена модель показує, що при всіх режимах роботи інвертора на навантаженні спостерігається стабільна напруга. При зміні інвертором режиму роботи ніяких перепадів не спостерігалось. Були реалізовані режими роботи: підтримання напруги на навантаженні в режимі веденого, підтримання напруги на навантаженні в режимі ведучого.

При роботі СЕС з мережею норми якості електричної енергії не порушуються, а при перехідних режимах роботи ЕС порушуються по параметру коефіцієнту гармонійних складових напруги.

Послідовне або з невеликою різницею в часі неузгоджене між собою ввімкнення та вимкнення СЕС та потужних споживачів, призводить до зростання кількості та амплітуд гармонік в напрузі фаз ЕС та до затяжних перехідних процесів.

Гармонійні складові в напрузі ЕС негативно впливають на технічний стан високовольтного обладнання ЛЕС (особливо такою, яке відпрацювало паспортний ресурс), та можуть призвести до його пошкодження.

Тому для покращення показників якості електроенергії в мережі було розроблено модель блоку керування інвертора з фільтром від гармонійних складових. Результати моделі позитивні.

В економічному розділі було обґрунтовано економічну оцінку наслідків низької якості електричної енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Західна маркетингова компанія. Ринок сонячної енергетики. 2019.
2. Впровадження сонячних електростанцій та дослідження їх впливу на роботу електроенергетичних систем. – 2017. – 20с.
3. Исследование параллельной работы солнечной электростанции с сетью / Ф. Р. Исмагилов, Б. Н. Шарифов, Б. М. Гайсин, Т. Р. Терегулов, Н. Л. Бабкина - 2016. Т. 20, № 4 (74). с. 71–79.
4. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. СПб: КОРОНА-принт 2001.320 с.
5. Лежнюк П.Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЕС. / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, І.О. Гунько - УДК621.316
6. Виссарионов В.И., Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, М.: 2004.-448 с.
7. Розанов Ю.К. Силовая электроника в системах с нетрадиционными источниками электроэнергии, 2002. - № 3.
8. Григораш О.В., Промышленная энергетика / Перспективный источник электроэнергии на базе торцевых синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов / О.В.Григораш, Е.Г.Вайнер, 2000.
-№ 10. -с. 30-33.
9. Григораш О.В. Промышленная энергетика / Нетрадиционные автономные источники электроэнергии / О.В.Григораш, Ю.И.Стрелков, 2001- № 4. - с. 37-40
10. Гриценко А.И., Нетрадиционные возобновляемые источники энергии, М.: ВНИИГАЗ. - 1996.
11. Дьяков А.Ф. Ветроэнергетика России. Состояние и перспективы развития, М.: МЭИ. - 1996.

12. Кожарский Г.В., Методы автоматизированного проектирования источников вторичного электропитания, М.: Радио и связь. -1985. - 184 с.
13. Креймер А.С., Материалы научной конференции «Энергосберегающие технологии и процессы в АПК» / Использование аккумулирующих систем на ветроэлектростанциях, Краснодар, 2000. с. 47-48.
14. Инверторы напряжения. Принципы построения инверторов.
http://avtomobil.vipsekret.ru/a_avtomobil&invertori-napryazheniya&4.htm
15. Academic Press. Power Electronics Handbook. 2001.
16. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Минск.: ИПК Изд-во стандартов. — 1998. — 30 с.
17. Качество электрической энергии Том 1 «Экономико-правовая база качества электрической энергии в Украине и Евросоюзе» / под редакцией Гриба О.Г. / Монография ПП «Граф-Ікс». Харьков: 2014г.-300 с.
18. Шидловский А.К. Экономическая оценка последствий снижения качества электрической энергии в современных системах электроснабжения. / А.К.Шидловский, В.Г.Кузнецов, В.Г. Николаенко - К., 1981. - 48 с.

ДОДАТОК А

Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи

№	Формат	Позначення	Найменування	Кількість аркушів	Примітка
1					
2			Документація		
3					
4	A4		Пояснювальна записка	95	
5					
6			Графічні матеріали		
7					
8					
9					
10					