МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електроніки, інформаційних систем
та програмного забезпечення
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

на тему Розробка інвертора для автономної сонячної станції

Виконав: студент ___курсу, групи 6.1712___
спеціальності 171 «Електроніка»
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Електроніка
(код і назва освітньої програми)

Котухов Р.П.
(ініціали та прізвище)

Керівник Доцент Шмалій С.Л.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент зост. дир. ПП НВП „Екотех" Шершов С.А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026 Рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 171 «Електроніка»
(код і назва)
Освітня програма Електроніка
(код і назва)
Спеціалізація _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Критська Т.В.
"9" 02 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Котухову Роману Петровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Розробка інвертора для автономної сонячної станції

керівник роботи Доцент Шмалій Сергій Леонідович,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "23" грудня 2025 року № 1830-с

2 Строк подання студентом роботи _____

3 Вихідні дані до роботи потужність 300 Вт, напруга 12 В

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити Аналіз існуючих інверторів для автономних сонячних електростанцій. Класифікація інверторів. Моделювання та аналіз роботи інвертора. Конструкторський розділ. Економічний розрахунок проекту.

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

Схема електрична структурна, схема електрична, результати моделювання, збірне креслення, охорона праці, економічні показники

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	к.т.н. доц. Шмалій С.Л.	11.05.26	17.05.26
2	к.т.н. доц. Шмалій С.Л.	18.05.26	24.05.26
3	к.т.н. доц. Шмалій С.Л.	25.05.26	31.05.26
4	к.т.н. доц. Шмалій С.Л.	01.06.26	07.06.26
5	к.т.н. доц. Шмалій С.Л.	08.06.26	08.06.26

7 Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Робота над 1 розділом	вик. 17.05.26	
2	Робота над 2 розділом	вик. 24.05.26	
3	Робота над 3 розділом	вик. 31.05.26	
4	Робота над 4 розділом	вик. 4.06.26	
5	Робота над 5 розділом	вик. 7.06.26	
6	Оформлення графічної частини	вик. 8.06.26	

Студент _____ Котухов Р.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ Шмалій С.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Гуриєв К.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи: 71 сторінок, 30 рисунків, 5 таблиць, 7 джерел.

Ключові слова: АВТОНОМНА СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ІНВЕРТОР, ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ МОДУЛЬ, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ, Н-МІСТ, MOSFET, MPPT-КОНТРОЛЕР, ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ, СИЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА.

Метою роботи є розробка інвертора для автономної сонячної електростанції, який забезпечує формування змінної напруги 220 В частотою 50 Гц для живлення побутових електроспоживачів, а також дослідження його характеристик шляхом комп'ютерного моделювання.

У роботі проведено аналіз сучасних автономних сонячних електростанцій та особливостей використання фотоелектричних модулів. Розглянуто принципи роботи систем відстеження точки максимальної потужності (MPPT) та виконано порівняльний аналіз основних алгоритмів керування. Проведено класифікацію інверторів, досліджено переваги та недоліки однокаскадних і двокаскадних топологій, а також виконано їх порівняльний аналіз за основними технічними характеристиками.

У роботі також розглянуто питання охорони праці та техніки безпеки під час розроблення й експлуатації сонячних інверторних систем, а також виконано економічне обґрунтування проекту.

ЗМІСТ

1.АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ІНВЕРТОРІВ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ 9
1.1 Сонячна енергія як джерело енергії 9
1.2 Фотоелектричні елементи 10
2.КЛАСИФІКАЦІЯ ІНВЕРТОРІВ 22
2.1 Огляд і порівняльний аналіз різних технологій інверторів 22
2.2. Багатокаскадні (двокаскадні) топології 23
2.3. Однокаскадні топології 28
3.МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РОБОТИ ІНВЕРТОРА 42
3.1 Моделювання Н-моста з ШІМ 42
3.2 Моделювання LCL-фільтра 44
3.3 Аналіз часових та частотних характеристик інвертора 46
3.4 Реалізація системи керування. 50
4. КОНСТРУКТОРСЬКО ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА 54
4.1 Конструкція інвертора 54
4.2 Охорона праці та техніка безпеки при розробці та експлуатації сонячної інвертної системи 57
4.3 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів 58
4.4 Заходи електробезпеки 58
4.5 Протипожежна безпека 59
4.6 Ергономічні вимоги до робочого місця 59
4.7 Надання першої допомоги при ураженні електричним струмом 60
5.ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОЕКТУ 61
5.1 Планування та визначення трудомісткості розробки 61
5.2 Розрахунок фонду оплати праці 62
5.3 Розрахунок витрат на електроенергію 63
5.4 Розрахунок амортизаційних відрахувань 63
5.5 Розрахунок накладних витрат 64
5.6 Калькуляція собівартості розробки 64
5.7 Визначення ціни розробки 65
5.8 Розрахунок економічного ефекту 65

5.9 Розрахунок рентабельності 66
5.10 Визначення терміну окупності 66
ВИСНОВКИ 68
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 70

ВСТУП

В умовах зростання споживання електричної енергії та постійного підвищення вартості традиційних енергоносіїв особливої актуальності набуває використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної енергетики. Автономні сонячні електростанції широко застосовуються для електропостачання приватних будинків, віддалених об'єктів, телекомунікаційних систем та інших споживачів, які не мають надійного доступу до централізованих електричних мереж.

Одним з ключових елементів автономної сонячної електростанції є інвертор — пристрій, призначений для перетворення постійної напруги, що надходить від акумуляторної батареї або фотоелектричних модулів, у змінну напругу стандартної частоти та амплітуди. Від характеристик інвертора значною мірою залежать ефективність роботи всієї системи, якість електричної енергії, надійність електропостачання та строк служби обладнання.

Сучасні інвертори для автономних сонячних електростанцій повинні забезпечувати високий коефіцієнт корисної дії, стабільність вихідної напруги, мінімальні гармонійні спотворення, а також мати розвинену систему захистів від перевантаження, короткого замикання, зниження напруги акумуляторної батареї та перегріву силових елементів. У зв'язку з цим актуальним є завдання розробки інвертора з оптимальною схемною реалізацією, що поєднує високі техніко-економічні показники та простоту конструкції.

Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка інвертора для автономної сонячної електростанції з вихідною напругою 220 В і частотою 50 Гц, придатного для живлення побутових електричних споживачів. Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно виконати аналіз існуючих схемних рішень інверторів, обґрунтувати вибір структурної

та принципової схем, провести розрахунок основних силових вузлів, а також розглянути конструктивні особливості пристрою.

У процесі виконання роботи використовуються методи аналізу електричних схем, розрахунку параметрів силових елементів, комп'ютерного моделювання електронних пристроїв, а також методи техніко-економічного обґрунтування.

Практична цінність роботи полягає в можливості використання розробленого інвертора в складі автономної сонячної електростанції, а також у застосуванні отриманих результатів під час проєктування та модернізації систем електроживлення на основі відновлюваних джерел енергії.

1.АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ІНВЕРТОРІВ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

1.1 Сонячна енергія як джерело енергії

Сонячна енергія є одним із найбільш перспективних та екологічно чистих джерел відновлюваної енергії, доступних на Землі. Вона формується завдяки випромінюванню Сонця у вигляді електромагнітних хвиль різної довжини, які досягають поверхні планети. Ці хвилі несуть енергію, здатну нагрівати середовища, освітлювати простір або перетворюватися на електричний струм. Основна перевага сонячної енергії полягає в її універсальності: вона доступна практично у будь-якому регіоні, може масштабуватися від невеликих побутових установок до великих промислових електростанцій і не залежить від вичерпних природних ресурсів.

Найпоширенішим способом використання сонячної енергії є фотоелектричне перетворення. Фотоелектричні елементи, які складають панель, базуються на p-n переходах напівпровідників. Коли на їх поверхню потрапляють фотони світла, відбувається збудження електронів, що створює електричний струм. Такий струм може накопичуватися в акумуляторах або направлятися на інвертори для перетворення у змінний струм, придатний для живлення побутових чи промислових споживачів.

Другим способом використання сонячної енергії є її теплове застосування. Сонячні колектори дозволяють нагрівати воду або повітря для побутових потреб, а концентруючі системи з лінзами та дзеркалами використовуються для генерації високих температур у промислових процесах. Теплова енергія Сонця може застосовуватися у гібридних системах, де поєднуються генерація електрики та нагрівання середовищ, підвищуючи загальну ефективність системи.

Попри численні переваги, сонячна енергія має й обмеження. Вона безпосередньо залежить від погодних умов, часу доби та сезону року. У

зимові місяці або під час хмарної погоди генерація значно знижується, що потребує використання систем накопичення енергії для забезпечення стабільного електропостачання. Початкові витрати на установку сонячних електростанцій залишаються відносно високими, проте державні програми підтримки, такі як «Зелений тариф» в Україні, дозволяють швидко окупити інвестиції, продаючи надлишок електроенергії державі за вигідною ціною. Завдяки цим механізмам економічна доцільність сонячних систем зростає, а їхнє впровадження стає більш масовим.

Сонячна енергія є ключовим чинником переходу до сталого розвитку. Вона дозволяє значно знизити викиди парникових газів та зменшити залежність від викопного палива, водночас забезпечуючи доступну, стабільну і безпечну електроенергію. Постійне вдосконалення технологій, підвищення ефективності фотоелементів і зниження вартості обладнання роблять сонячну енергію дедалі більш привабливою як для приватних домогосподарств, так і для промислових або комерційних об’єктів.

1.2 Фотоелектричні елементи

Фотоелектричні елементи, або PV-елементи, є основною складовою будь-якої сонячної електростанції. Вони виконують ключову функцію перетворення сонячного світла в електричну енергію за рахунок фотоефекту в напівпровідникових матеріалах. Кожен елемент складається з тонкого шару кремнію з p-n переходом, який створює внутрішнє електричне поле. Коли фотони світла потрапляють на поверхню елемента, вони збуджують електрони, які починають рух у вигляді електричного струму.

Сучасні PV-елементи класифікуються на три основні типи: монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові. Монокристалічні елементи виготовляються з чистого кремнію високої якості, що забезпечує високу ефективність перетворення сонячної енергії, компактність і довговічність. Їхні кристали мають однорідну структуру, що мінімізує втрати

енергії через внутрішні дефекти. Полікристалічні елементи виготовляються з плавленого кремнію, який охолоджується у формі блоків із кількома кристалічними зернами. Тонкоплівкові елементи створюються шляхом нанесення тонких шарів напівпровідника на підкладку, що робить їх легкими та гнучкими, проте менш ефективними порівняно з кремнієвими аналогами (табл.1.1).

Таблиця 1.1– Порівняльна таблиця основних типів PV-елементів

Характеристика	**Монокристалічні**	**Полікристалічні**	**Тонкоплівкові**
Матеріал	Чистий кремній	Плавлений кремній	Різні (CdTe, CIGS, аморфний Si)
Структура кристалів	Однорідна	Зерниста	Аморфна або шарова
Колір і зовнішній вигляд	Темно-чорний, однорідний	Темно-синій, неоднорідний	Темний або металевий блиск
Ефективність (ККД)	18–23%	12–18%	8–12%
Термін служби	До 25–30 років	20–25 років	10–20 років
Вартість	Висока	Середня	Низька
Переваги	Висока ефективність, компактність, довговічність	Доступність, простіше виробництво	Легкі, гнучкі, адаптовані до нестандартних поверхонь
Недоліки	Висока ціна	Нижча ефективність	Низький ККД, менший термін служби

Таким чином, вибір конкретного типу PV-елемента визначається умовами експлуатації, доступністю площі для встановлення та фінансовими можливостями. Монокристалічні панелі більше підходять для компактних і високопродуктивних рішень, полікристалічні — для домашніх і бюджетних систем, тоді як тонкоплівкові елементи використовуються у гнучких та інтегрованих конструкціях, наприклад, у сонячній черепиці або фасадних панелях BIPV.

У зв’язку з необхідністю підвищення ефективності алгоритмів керування фотоелектричними установками особливої важливості набуває їх математичне та комп’ютерне моделювання. Під час розроблення моделей необхідно враховувати специфіку функціонування та конструктивні особливості кожного елемента системи. Загальна схема автономної фотоелектричної установки на основі сонячних панелей наведена на рис. 1 і складається з таких основних компонентів:

- сонячна панель (PV-модуль) — виконує перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію та є основним джерелом живлення системи;
- пристрій відстеження точки максимальної потужності (MPPT-контролер) — забезпечує найбільш ефективне використання виробленої сонячною батареєю електроенергії шляхом підтримання оптимального режиму її роботи;
- інвертор — призначений для перетворення постійної напруги, що надходить від фотоелектричних модулів та акумуляторів, у змінну напругу стандартних параметрів, придатну для живлення побутових і промислових споживачів (220 В, 50 Гц);
- контролер заряду акумуляторної батареї — здійснює регулювання напруги, керує процесом заряджання накопичувачів енергії та забезпечує живлення навантаження постійним струмом. Крім того, він автоматично припиняє заряджання після досягнення повного заряду акумуляторів, запобігаючи їх пошкодженню через перезаряд. У найпростіших реалізаціях контролер лише комутує батареї, тоді як сучасні моделі можуть підвищувати недостатню напругу від сонячних модулів за умов низької освітленості, компенсуючи її за рахунок зменшення струму;
- акумуляторна батарея — накопичує надлишкову електроенергію, вироблену в періоди високої сонячної активності, та віддає її споживачам за нестачі генерації або під час короткочасного збільшення навантаження;

- резервне джерело електроживлення (генератор)— використовується для забезпечення безперервної роботи системи в разі тривалої відсутності достатнього рівня сонячного випромінювання або інших аварійних ситуацій.

Потужність, яку здатна генерувати сонячна фотоелектрична батарея, а також її електричні характеристики значною мірою залежать від умов навколишнього середовища. На відміну від традиційних джерел електричної енергії, фотоелектричні модулі мають складні нелінійні характеристики, які змінюються під впливом зовнішніх факторів. Найсуттєвіший вплив на роботу сонячних панелей здійснюють інтенсивність сонячного випромінювання та температура фотоелектричних елементів. Саме тому під час проектування, дослідження та моделювання фотоелектричних систем необхідно враховувати зміну цих параметрів для забезпечення максимальної ефективності роботи установки.

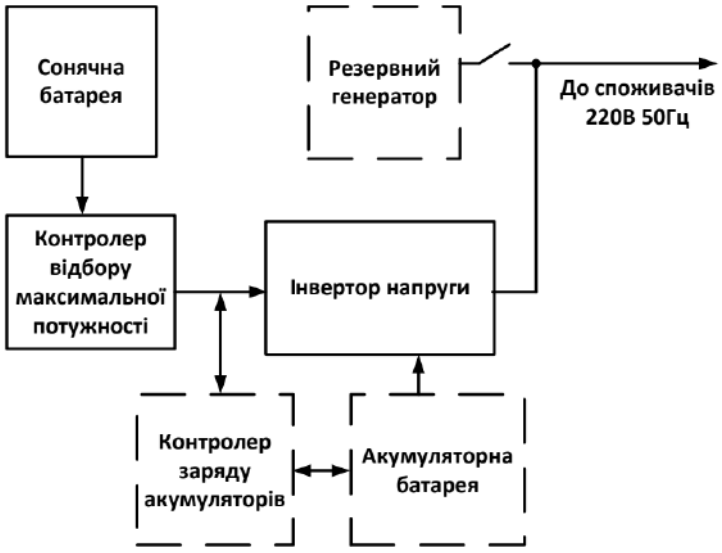


Рис. 1.1. – Загальна схема автономної сонячної фотоелектричної системи

Основною характеристикою, що визначає режим функціонування сонячної батареї, є її вольт-амперна характеристика (ВАХ). Вона відображає залежність вихідного струму від напруги на затискачах фотоелектричного модуля. На відміну від звичайних електротехнічних елементів, ВАХ сонячної

батареї має виражений нелінійний характер, що значно ускладнює процес вибору оптимального режиму роботи. Аналіз цієї характеристики дозволяє визначити можливості фотоелектричного модуля щодо виробництва електричної енергії за різних умов експлуатації.

Граничними параметрами вольт-амперної характеристики є напруга холостого ходу U_{OC} та струм короткого замикання I_{CS}. Напруга холостого ходу відповідає режиму, коли навантаження відсутнє і струм через батарею не протікає, тоді як струм короткого замикання визначається при нульовій напрузі на виході модуля. Ці параметри є важливими для оцінки працездатності сонячної батареї та використовуються під час розрахунків її експлуатаційних характеристик.

Фактичні значення вихідної напруги та струму визначаються не лише внутрішніми параметрами фотоелектричного модуля, а й зовнішніми умовами роботи. Зокрема, величина генерованої потужності залежить від поверхневої густини потоку сонячного випромінювання W, температури p-n переходів фотоелементів T та опору навантаження R_L, підключеного до батареї. Зі збільшенням інтенсивності сонячного випромінювання зростає струм, який може виробляти сонячна батарея, а отже, збільшується і максимальна потужність системи. Водночас підвищення температури фотоелементів негативно впливає на рівень вихідної напруги, що призводить до зниження ефективності роботи фотоелектричного модуля [1] (рис 1.2).

Для кожного конкретного поєднання параметрів освітленості та температури існує певний режим роботи, за якого сонячна батарея забезпечує найбільшу вихідну потужність. Цей режим характеризується відповідними значеннями струму та напруги і називається точкою максимальної потужності (Maximum Power Point, MPP). Саме в цій точці коефіцієнт корисного використання сонячної енергії є найбільшим, а система працює з максимально можливою ефективністю.

Особливістю фотоелектричних систем є те, що положення точки максимальної потужності не є сталим. Воно постійно змінюється під впливом

погодних умов, часу доби, сезонних коливань, хмарності, забруднення поверхні панелей та інших факторів. У ранкові та вечірні години рівень сонячного випромінювання значно нижчий, ніж у полуденний час, що призводить до зміни параметрів ВАХ і відповідного зміщення точки максимальної потужності. Аналогічний ефект спостерігається під час проходження хмар або при різких змінах температури навколишнього середовища.

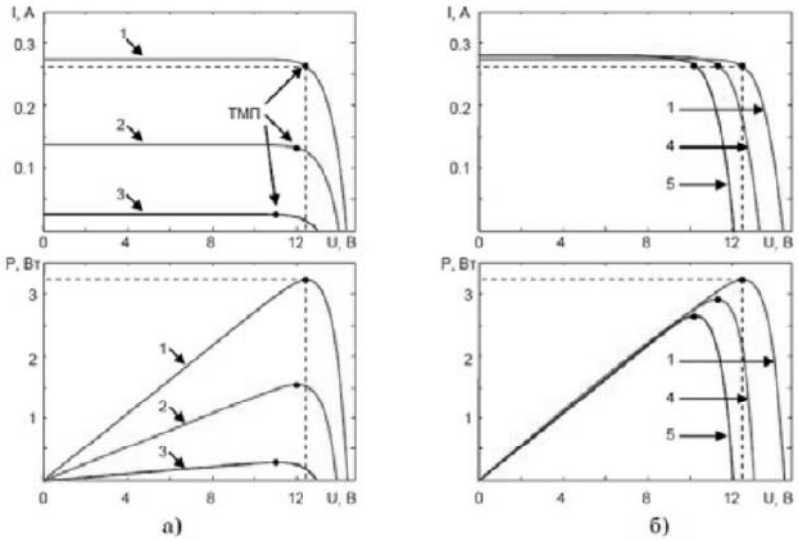


Рисунок 1.2 – ВАХ та характеристика P-U (ВАТ) сонячних батарей YH116*116-12A/B250 при зміні потужності сонячного випромінювання (а) і температури (б):

1 – W = 1000 Вт/м2 при T = 25 °C, 2 – W = 500 Вт/м2 при T = 25 °C, 3 – W= 100 Вт/м2 при T = 25°C, 4 – W = 1000 Вт/м2 при T = 45 °C, 3 – W = 1000 Вт/м2 при T = 65 °C

Якщо фотоелектричний модуль підключити безпосередньо до навантаження без додаткових засобів керування, його робоча точка визначатиметься виключно характеристиками навантаження. У більшості випадків така робоча точка не збігатиметься з точкою максимальної потужності, через що частина потенційно доступної енергії залишатиметься

невикористаною. У результаті загальна ефективність фотоелектричної системи суттєво знижується, особливо в умовах нестабільної освітленості.

Для усунення зазначеної проблеми в сучасних сонячних енергетичних установках використовуються системи відстеження точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Такі системи встановлюються між сонячною батареєю та навантаженням і забезпечують автоматичне налаштування режиму роботи фотоелектричного модуля. Завдяки цьому вдається підтримувати функціонування системи поблизу точки максимальної потужності незалежно від змін зовнішніх умов.

MPPT-пристрої являють собою спеціалізовані електронні контролери, які безперервно вимірюють електричні параметри сонячної батареї та виконують аналіз її поточного стану. На основі отриманих даних контролер визначає напрямок зміни робочих параметрів і формує сигнали керування для силового перетворювача. У результаті забезпечується оптимальне узгодження між сонячною батареєю та навантаженням, що дозволяє отримати максимальну кількість електричної енергії.

Як правило, MPPT-контролери інтегруються до складу DC-DC або DC-AC перетворювачів, які виконують не лише функцію пошуку точки максимальної потужності, а й забезпечують стабілізацію напруги, регулювання струму, узгодження параметрів джерела та навантаження, а також захист обладнання від аварійних режимів роботи. Такі пристрої широко використовуються як у автономних фотоелектричних системах із накопиченням енергії, так і в мережевих сонячних електростанціях.

На сьогоднішній день розроблено значну кількість алгоритмів MPPT-керування. Серед них найбільш відомими є метод збурення та спостереження (P&O), метод інкрементальної провідності (Incremental Conductance), алгоритми на основі нечіткої логіки, нейронних мереж та адаптивних систем керування. Кожен із цих методів має власні переваги та недоліки, які проявляються в точності відстеження точки максимальної потужності,

швидкості реагування на зміни умов експлуатації, складності реалізації та вартості апаратного забезпечення.

Одним із найпоширеніших алгоритмів є метод (P&O), принцип роботи якого полягає у періодичній зміні робочої напруги фотоелектричного модуля та аналізі відповідної зміни потужності. Якщо потужність збільшується, зміна напруги продовжується в тому ж напрямку; якщо потужність зменшується, напрямок регулювання змінюється на протилежний. Незважаючи на простоту реалізації, цей метод має певні недоліки, зокрема наявність коливань робочої точки поблизу MPP та зниження точності роботи при швидких змінах освітленості.

Для усунення зазначених недоліків у даній роботі використовується вдосконалений алгоритм Three Point Weight Comparison (TWC), який базується на аналізі трьох сусідніх робочих точок і застосовує змінний крок регулювання. Такий підхід дозволяє підвищити точність пошуку точки максимальної потужності та зменшити втрати енергії в процесі відстеження.

Особливістю методу TWC є його здатність адаптуватися до швидких змін параметрів навколишнього середовища. Контролер виконує аналіз змін струму та напруги, оцінює тенденцію зміни потужності та прогнозує подальший розвиток процесу. Завдяки використанню трьох контрольних точок алгоритм більш точно визначає положення точки максимальної потужності та забезпечує стабільнішу роботу системи порівняно з класичним методом (P&O).

Використання алгоритму TWC дозволяє значно зменшити амплітуду коливань потужності поблизу оптимального режиму роботи, підвищити швидкість адаптації до змін сонячної радіації та покращити загальну ефективність фотоелектричної системи. Хоча реалізація такого алгоритму потребує більшого обсягу обчислювальних ресурсів і складнішого програмного забезпечення контролера, отримані переваги виправдовують його застосування в сучасних високоефективних системах сонячної енергетики(рис.1.3).

Алгоритм Three Point Weight Comparison (TWC) ґрунтується на використанні диференціальних характеристик фотоелектричного масиву для визначення положення точки максимальної потужності. Основна ідея методу полягає в аналізі залежності між зміною струму та зміною напруги сонячної батареї з метою оцінки напрямку зміщення робочої точки відносно оптимального режиму роботи.

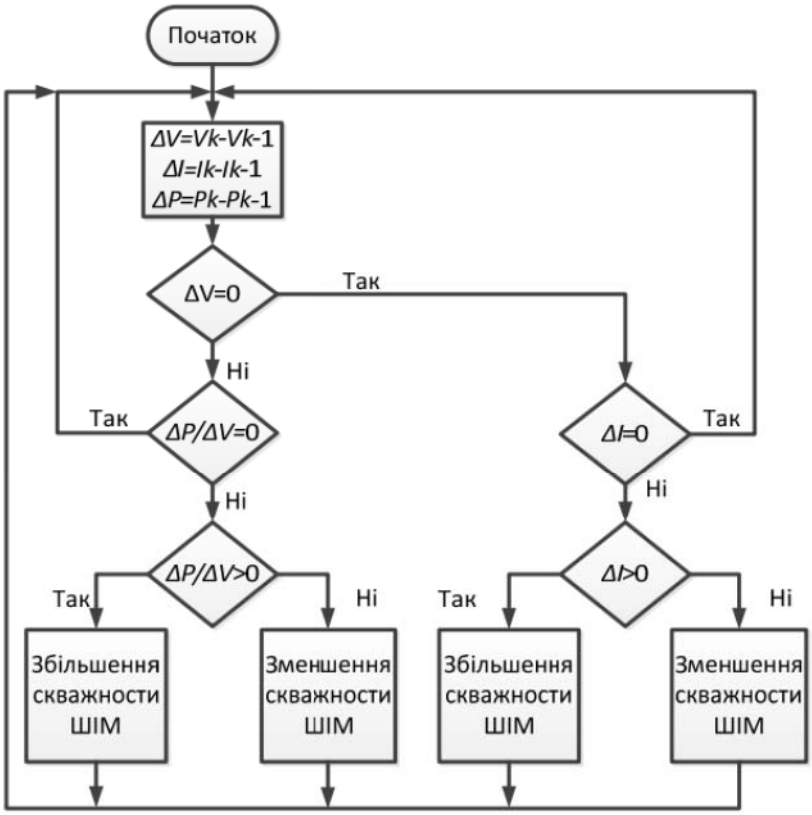


Рисунок 1.3. – Алгоритм методу TWC

На відміну від простіших алгоритмів пошуку точки максимальної потужності, метод TWC використовує не лише поточні значення електричних параметрів, але й швидкість їх зміни. Для цього обчислюється приріст струму відносно приросту напруги (dI/dU), який характеризує так звану диференціальну або інкрементальну провідність фотоелектричного масиву. Отримане значення порівнюється з миттєвою провідністю сонячної батареї, що визначається як відношення струму до напруги (I/U).

Принцип роботи алгоритму базується на тому, що в точці максимальної потужності виконується умова рівності інкрементальної та миттєвої провідностей. Іншими словами, коли значення ((I/U)) та (dI/dU) збігаються, робоча напруга фотоелектричного модуля відповідає напрузі, за якої генерується максимальна потужність.

Досягнення цієї умови свідчить про те, що система працює в оптимальному режимі та забезпечує найефективніше використання сонячної енергії.

Після визначення точки максимальної потужності контролер підтримує відповідне значення напруги на виході сонячної батареї. Робочий режим зберігається доти, доки зовнішні умови залишаються незмінними. У разі зміни рівня сонячного випромінювання, температури фотоелементів або параметрів навантаження відбувається зміщення точки максимальної потужності, тому алгоритм автоматично запускає новий цикл розрахунків для визначення оновленого оптимального режиму роботи.

Завдяки постійному моніторингу електричних параметрів фотоелектричного масиву метод TWC забезпечує високу точність відстеження точки максимальної потужності навіть за швидкоплинних змін погодних умов. Це особливо важливо для реальних систем сонячної генерації, де рівень інсоляції може змінюватися протягом кількох секунд через появу хмарності, затінення окремих панелей або коливання температури навколишнього середовища.

У структурі досліджуваної фотоелектричної системи алгоритм TWC використовується для керування роботою підвищувального DC-DC перетворювача, який підключається безпосередньо до виходу сонячної батареї. Основним завданням цього перетворювача є регулювання потоку енергії між фотоелектричним модулем та подальшими елементами системи. Змінюючи коефіцієнт перетворення, контролер забезпечує підтримання робочої точки поблизу MPP та максимізує кількість енергії, що передається до навантаження або акумуляторної батареї.

Підвищувальний перетворювач виконує важливу функцію узгодження параметрів сонячного модуля з параметрами електричної системи. Оскільки напруга, що генерується фотоелектричними панелями, змінюється залежно від умов експлуатації, використання такого перетворювача дозволяє підтримувати стабільний режим роботи незалежно від коливань вхідних параметрів. Це сприяє підвищенню загального коефіцієнта корисної дії фотоелектричної установки та покращенню якості електроживлення споживачів.

Завершальним етапом перетворення електричної енергії в автономній фотоелектричній системі є робота інвертора. Цей пристрій забезпечує перетворення постійного струму, який надходить від сонячних батарей або акумуляторних накопичувачів, у змінний струм із параметрами, придатними для живлення побутових та промислових електроприймачів. Саме інвертор формує вихідну напругу стандартної частоти та амплітуди, необхідну для нормального функціонування електричного обладнання.

Однією з найважливіших вимог до сучасних інверторів є висока якість вихідної синусоїдальної напруги. Для забезпечення стабільної роботи електронної техніки та електродвигунів коефіцієнт гармонічних спотворень повинен залишатися мінімальним і, як правило, не перевищувати 3 %. Крім того, інвертор повинен підтримувати стабільне значення вихідної напруги навіть при зміні рівня навантаження, оскільки значні відхилення можуть негативно впливати на роботу підключених споживачів.

Важливою характеристикою інвертора є його здатність виконувати подвійне перетворення енергії між колами постійного та змінного струму. Така можливість дозволяє ефективно взаємодіяти з акумуляторними батареями, забезпечуючи як живлення навантаження, так і процес накопичення електроенергії. Крім цього, сучасні інвертори оснащуються системами автоматичного керування, які контролюють стан акумуляторів та запобігають їх надмірному розрядженню.

Для підвищення надійності роботи фотоелектричної системи інвертори обладнуються комплексом захисних функцій. До них належать захист від коротких замикань, перевантажень, перегріву силових елементів, перенапруги та зниження напруги нижче допустимого рівня. Наявність таких механізмів дозволяє уникнути пошкодження обладнання та забезпечити безпечну експлуатацію системи в різних режимах роботи.

Під час вибору інвертора також необхідно враховувати його перевантажувальну здатність. На практиці рекомендується використовувати обладнання, яке може короткочасно витримувати навантаження, що перевищує номінальне у 1,5–2 рази. Такий запас потужності особливо важливий для живлення електродвигунів, компресорів, насосів та інших пристроїв із великими пусковими струмами. Завдяки цьому інвертор здатний забезпечити надійний запуск навантаження без ризику аварійного вимкнення або пошкодження силових компонентів.

Отже, спільне використання алгоритму TWC, підвищувального перетворювача та високоякісного інвертора дозволяє створити ефективну систему керування потоками енергії у фотоелектричній установці. Такий підхід забезпечує максимальне використання енергії сонячного випромінювання, стабільне електроживлення споживачів і підвищення загальної енергоефективності автономної сонячної електростанції [2].

2.КЛАСИФІКАЦІЯ ІНВЕРТОРІВ

2.1 Огляд і порівняльний аналіз різних технологій інверторів

Інвертори є одним із базових і найбільш критичних елементів сучасної силової електроніки, які забезпечують перетворення електричної енергії з постійного струму (DC) у змінний струм (AC). Таке перетворення є необхідним для інтеграції джерел відновлюваної енергії в існуючі електроенергетичні системи, оскільки більшість електричних мереж та кінцевих споживачів функціонують саме на основі змінного струму.

Основними джерелами постійного струму у сучасних енергетичних системах є фотоелектричні сонячні панелі, вітрогенератори малої та середньої потужності, а також акумуляторні батареї та системи накопичення енергії. Усі ці джерела характеризуються нестабільністю вихідних параметрів, що додатково підвищує вимоги до інверторних систем.

Після виконання процесу перетворення інвертор формує змінний струм необхідної частоти, амплітуди та форми сигналу, який може використовуватись для живлення побутових пристроїв, промислового обладнання або для передачі в загальну електричну мережу. Таким чином, інвертор не лише виконує функцію перетворення енергії, але й забезпечує повне узгодження параметрів електроенергії з вимогами навантаження або мережі.

У сучасних умовах розвитку відновлюваної енергетики інвертори виконують також додаткові функції, зокрема забезпечують захист системи, стабілізацію напруги, компенсацію реактивної потужності та контроль якості електроенергії.

Сучасні інженерні підходи до побудови інверторів базуються на детальному аналізі їх топологічної структури. Саме архітектура інвертора визначає його ключові технічні показники, серед яких коефіцієнт корисної дії, рівень енергетичних втрат, електромагнітна сумісність, динамічні

характеристики, а також вартість виготовлення та експлуатації. Особливо це є важливим у системах відновлюваної енергетики, де навіть незначне підвищення ефективності може суттєво вплинути на загальну генерацію енергії.

Класифікація інверторів здійснюється на основі їх структурних, функціональних та схемотехнічних особливостей. До основних критеріїв відносять кількість каскадів перетворення, тип силових ключів, спосіб керування енергетичними потоками, а також наявність або відсутність трансформаторної ізоляції.

У сучасній науково-технічній літературі основна увага приділяється розвитку високоефективних топологій, які забезпечують мінімальні втрати енергії, високу щільність потужності та зменшення кількості активних компонентів. Окремим напрямом досліджень є також підвищення надійності та зниження вартості інверторних систем.

2.2. Багатокаскадні (двокаскадні) топології

Двокаскадні інверторні системи є класичним та широко застосовуваним рішенням у галузі силової електроніки. Вони традиційно складаються з двох послідовних функціональних блоків: підвищувального DC-DC перетворювача (boost converter) та повномостового інвертора (full-bridge inverter), який формує змінну напругу необхідної форми.

Така структура дозволяє розділити процеси регулювання напруги та інверсії струму, що спрощує алгоритми керування та підвищує гнучкість системи. Однак наявність двох каскадів призводить до збільшення загальної кількості силових елементів, складності схеми, а також до додаткових втрат енергії на кожному етапі перетворення.

З метою покращення характеристик таких систем у сучасних дослідженнях активно розглядаються модифіковані двокаскадні топології, які

спрямовані на зниження комутаційних втрат, покращення форми вихідної напруги та підвищення коефіцієнта корисної дії (рис.2.1).

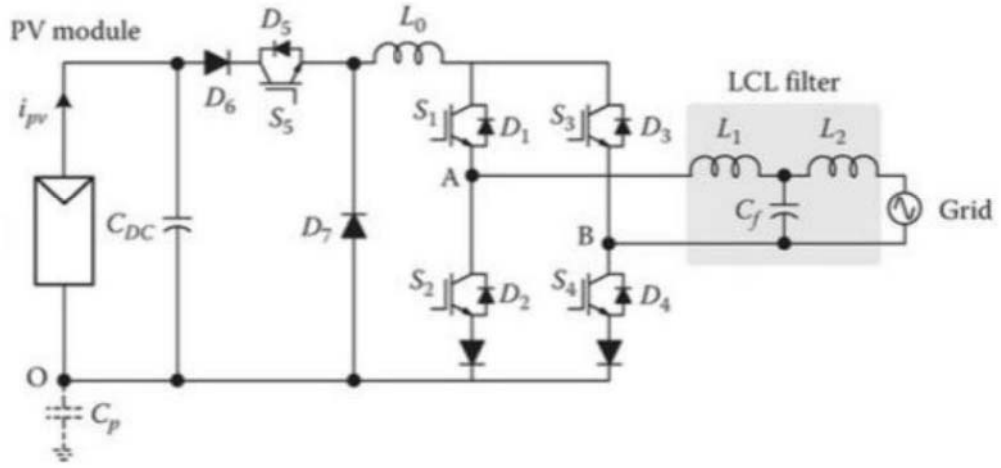


Рисунок 2.1 – Повномостовий безтрансформаторний інвертор

Подальшим етапом еволюції двокаскадних інверторних рішень є використання перетворювачів частоти з поділом робочого періоду, які відносяться до більш сучасних методів керування силовими електронними системами. Основною ідеєю таких схем є оптимізація часових інтервалів комутації силових ключів, що досягається завдяки застосуванню удосконалених алгоритмів керування.

У цих системах процес перемикання ключів синхронізується таким чином, щоб зменшити втрати на переходних процесах, зокрема втрати при вмиканні та вимиканні транзисторів. Це дозволяє значно підвищити загальну енергетичну ефективність інвертора та зменшити теплове навантаження на силові елементи.

Додатково такі підходи позитивно впливають на якість вихідної напруги, оскільки більш точне керування формою сигналу дозволяє знизити рівень гармонічних складових. У результаті покращується синусоїдальність вихідного сигналу та зменшується коефіцієнт гармонічних спотворень (THD), що є особливо важливим для роботи інверторів у мережевих

системах, де висуваються жорсткі вимоги до якості електроенергії [4] (рис.2.2).

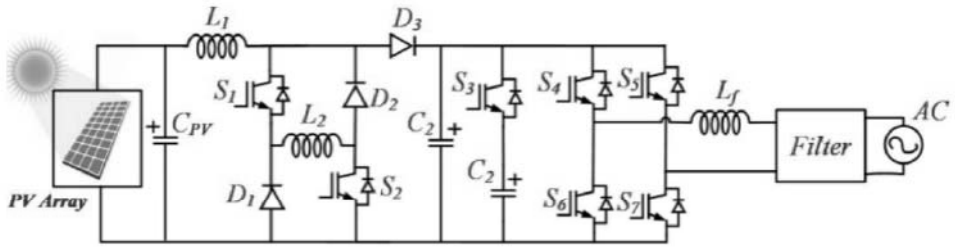


Рисунок 2.2 – Перетворювач частоти з поділом періоду з повномостовим безтрансформаторним інвертором

Окрему та важливу категорію сучасних силових перетворювачів становлять безтрансформаторні інвертори, які оснащені інтегрованими системами зворотного зв’язку та схемами подвійного заземлення. Такі архітектури вважаються особливо перспективними у сфері фотоелектричних систем, оскільки поєднують у собі високу енергоефективність, зменшену масу та габарити, а також покращені показники електромагнітної сумісності.

У подібних схемах підвищувальний DC-DC перетворювач працює у складі замкненої системи керування. Система зворотного зв’язку постійно відстежує вихідні параметри напруги та струму, забезпечуючи їх стабілізацію навіть за умов значних коливань вхідної потужності, які характерні для фотоелектричних панелей через зміну рівня сонячного випромінювання, температури та інших зовнішніх факторів.

Крім того, застосування інтегрованих силових структур дозволяє використовувати спільні ключові елементи для різних режимів роботи, що зменшує загальну кількість транзисторів, діодів та допоміжних компонентів. Це, у свою чергу, підвищує щільність потужності системи та зменшує її габарити при збереженні високих енергетичних показників.

Такі інверторні рішення демонструють високі експлуатаційні характеристики, зокрема коефіцієнт нелінійних спотворень (THD) нижче 3%, а також коефіцієнт корисної дії на рівні понад 94%, що робить їх

конкурентоспроможними серед сучасних високоефективних перетворювачів (рис2.3).

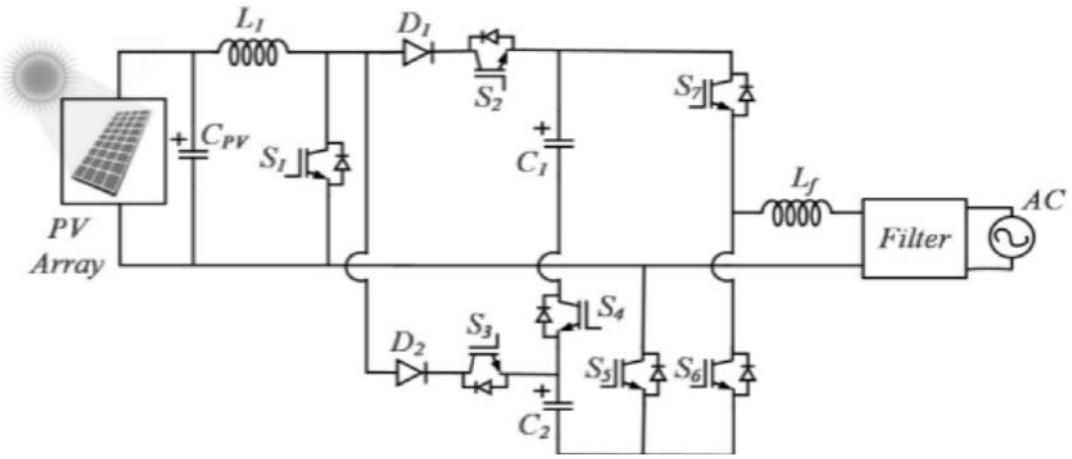


Рисунок 2.3 – Підсилювач зі зворотним зв'язком та подвійним заземленням

Для проведення більш глибокого та об’єктивного аналізу двокаскадних інверторних рішень доцільно розглядати їх як складні енергетичні системи, що складаються з декількох функціональних блоків, кожен з яких впливає на загальні характеристики перетворювача. Такий підхід дозволяє оцінювати не лише кінцеві показники ефективності, але й внутрішні процеси енергоперетворення.

До основних технічних параметрів, які використовуються для порівняння двокаскадних топологій, відносяться: діапазон вхідної та вихідної напруги, номінальна потужність, частота перемикання силових ключів, швидкість комутаційних процесів, рівень втрат на перемикання та провідність, а також загальний коефіцієнт корисної дії системи. Окремо також можуть враховуватися показники електромагнітної сумісності та стійкості до змін навантаження.

Важливим є те, що подібний багатопараметричний аналіз дозволяє не лише оцінити ефективність конкретної топології, але й визначити її практичну придатність для різних умов експлуатації, включаючи автономні системи електропостачання, мережеві фотоелектричні станції та гібридні енергетичні комплекси (табл. 2.1.).

Таблиця 2.1 – Порівняльне дослідження характеристик топологій двокаскадних інверторів

Топологія	Вхідна напруга (Vin), В	Вихідна напруга (Vout, Vrms), В	Номінальна потужність (Power rating), Вт	Частота (Frequency), Гц	Час перемикання (Switching Timing), с	Ефективність, %
Повномостовий безтрансформаторний інвертор	160	210	1500	20	0,05	94
Перетворювач частоти з поділом періоду з повномостовим безтрансформаторним інвертором	140	200	1600	20	0,05	96,5
Безтрансформаторний інвертор на основі підсилювача зі зворотним зв'язком	150	115	930	18	0,055	96,7

Отримані результати порівняння показують, що хоча різні двокаскадні топології мають відносно близькі значення коефіцієнта корисної дії (у межах 94–96,7%), вони суттєво відрізняються за іншими критично важливими

характеристиками. Зокрема, спостерігається різний рівень конструктивної складності, що безпосередньо впливає на кількість силових елементів, складність монтажу та вартість реалізації системи.

Крім того, різні архітектури мають відмінні вимоги до алгоритмів керування: деякі з них потребують складних систем синхронізації та регулювання струму, тоді як інші можуть працювати з більш простими методами керування, але при цьому поступаються у точності або динамічних характеристиках.

Окремо слід відзначити теплові втрати, які залежать від кількості каскадів та ефективності кожного етапу перетворення енергії. Чим більше етапів містить система, тим вищою є ймовірність накопичення втрат, що впливає на загальний тепловий режим інвертора та потребу у системах охолодження.

Таким чином, вибір двокаскадної топології не може базуватися виключно на значенні ККД, а повинен враховувати комплекс технічних, економічних та експлуатаційних факторів, включаючи масштабованість системи під різні рівні потужності та умови роботи.

2.3. Однокаскадні топології

Сучасний розвиток силової електроніки характеризується чіткою та стабільною тенденцією до скорочення кількості каскадів перетворення електроенергії. Основною причиною такого підходу є прагнення підвищити загальну енергоефективність системи шляхом зменшення кількості етапів перетворення, кожен з яких супроводжується втратами енергії.

Додатковими факторами є підвищення надійності системи, зниження ймовірності відмови через зменшення кількості активних компонентів, а також зменшення габаритів та вартості обладнання. У результаті однокаскадні інвертори стали важливим напрямом розвитку сучасних фотоелектричних та гібридних енергетичних систем.

Однокаскадні інвертори реалізують функції підвищення напруги та інверсії змінного струму в межах одного силового каскаду. Така інтеграція дозволяє значно спростити загальну структуру системи, зменшити кількість силових ключів, дроселів та допоміжних елементів, а також покращити енергетичну щільність системи.

У таких схем важливу роль відіграють накопичувальні елементи, найчастіше конденсатори великої ємності. Вони підключаються паралельно до джерела постійного струму (наприклад, фотоелектричного модуля) та виконують функцію буферизації енергії. Це дозволяє згладжувати пульсації потужності, компенсувати швидкі зміни навантаження та забезпечувати стабільність роботи інвертора.

Одним із характерних прикладів є універсальний одноступеневий мережевий інвертор, який може працювати як у режимі підключення до електричної мережі (grid-tied), так і в автономному режимі (stand-alone). Така універсальність досягається завдяки використанню єдиної системи керування, яка здатна адаптуватися до різних режимів роботи без суттєвого переналаштування алгоритмів.

Ключовою перевагою цієї архітектури є спрощення структури керування та зменшення обчислювального навантаження на систему контролера, що підвищує надійність та швидкодію всього перетворювача. Параметри інвертора: вхідна напруга 16,8 В, вихідна напруга 110 В, номінальна потужність 200 Вт, частота 10 Гц, час перемикання 0,1, ефективність 70% (рис.2.5).

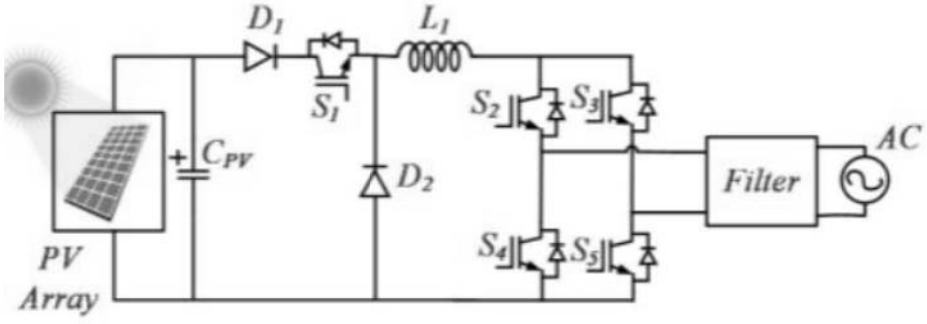


Рисунок 2.5 – Універсальний одноступеневий мережевий інвертор

Ще одним важливим класом однокаскадних інверторних рішень є buck-boost інвертори, які характеризуються високою гнучкістю у процесах перетворення електричної енергії. Їх ключова особливість полягає у здатності працювати в різних режимах регулювання напруги, що включають понижуючий режим (buck), підвищуючий режим (boost), а також комбінований режим buck-boost, у якому відбувається як зниження, так і підвищення вихідної напруги відносно вхідної.

Така універсальність є особливо важливою для фотоелектричних систем, де параметри джерела постійного струму не є сталими величинами. Рівень вихідної напруги сонячних панелей суттєво змінюється залежно від інтенсивності сонячного випромінювання, температури навколишнього середовища, стану навантаження, а також режиму роботи самої системи максимального відбору потужності (MPPT). Завдяки цьому buck-boost інвертори здатні забезпечувати стабілізацію вихідних параметрів навіть за умов значних і швидких коливань вхідної енергії, підтримуючи необхідні параметри змінного струму на виході.

Крім того, такі топології забезпечують більш ефективне узгодження між джерелом енергії та навантаженням, що дозволяє підвищити загальний коефіцієнт використання енергії фотоелектричної системи та зменшити втрати на етапах перетворення. Параметри інвертора: вхідна напруга 200–350 В, вихідна напруга 230 В, номінальна потужність 1000 Вт, ефективність 93,6% (рис.2.6).

Окремий і більш складний підклас становлять антипаралельні інверторні структури, побудовані на основі двох незалежних buck-boost перетворювачів. Такі системи реалізують принцип розподіленого енергоперетворення, при якому кожен канал може працювати автономно або в координації з іншим, залежно від режиму навантаження та умов генерації.

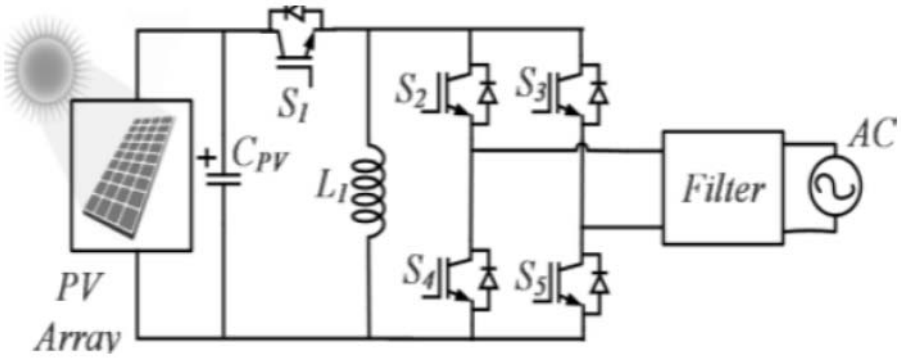


Рисунок 1.6 – Однокаскадний інвертор з buck-boost

Особливістю даних схем є робота у режимі розривного струму (DCM — Discontinuous Conduction Mode), що дозволяє зменшити комутаційні втрати, особливо при малих та середніх навантаженнях. Це також сприяє спрощенню умов керування силовими ключами, оскільки струм індуктивності встигає спадати до нуля перед кожним наступним циклом перемикання, знижуючи складність аналізу динамічних процесів у системі.

Застосування двох незалежних каналів перетворення енергії забезпечує більш рівномірний розподіл теплового навантаження між силовими елементами, що позитивно впливає на тепловий режим роботи пристрою. У результаті зменшується локальний перегрів компонентів, підвищується їх ресурс, а також загальна надійність системи.

Додатково така структура покращує динамічні характеристики інвертора, оскільки дозволяє швидше реагувати на зміни навантаження та коливання вхідної напруги, що є критично важливим для автономних енергосистем. Параметри інвертора: вхідна напруга 40 – 50 В, вихідна напруга 90 – 110 В, номінальна потужність 500 Вт, частота 9,2 Гц, час перемикання 0,092, ефективність 80 – 90% (рис 2.7).

Особливе місце серед однокаскадних топологій займають Z-джерельні інвертори, які базуються на використанні спеціальної LC-мережі імпедансного типу, розташованої між джерелом постійного струму та силовим інверторним мостом. Така імпедансна мережа виконує функцію енергетичного буфера та одночасно забезпечує можливість підвищення або

зниження напруги без необхідності використання окремого DC–DC boost перетворювача.

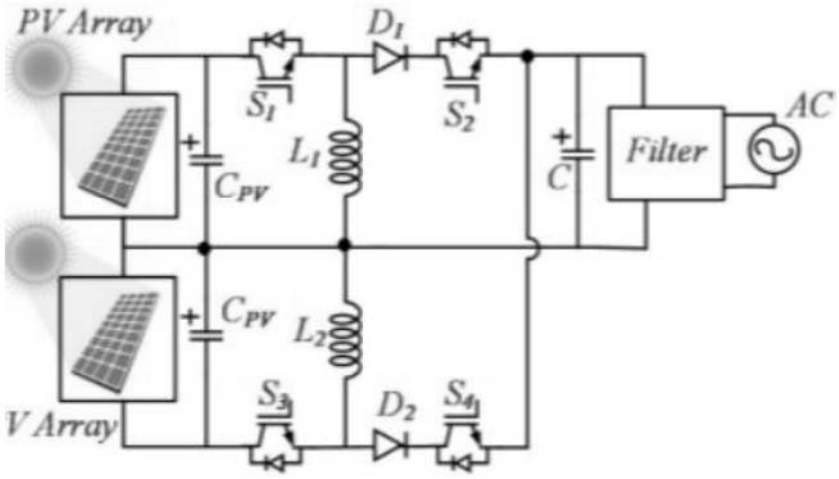


Рисунок 2.7 – Антипаралельний інвертор з двома джерелами живлення

Завдяки цьому Z-джерельні інвертори дозволяють реалізувати так званий “shoot-through” режим керування, при якому можливе короткочасне замикання ключів інверторного плеча без пошкодження системи. Це розширює можливості керування та підвищує гнучкість регулювання вихідної напруги.

Водночас такі інверторні топології мають і певні обмеження. Основним з них є відносно вузький діапазон ефективної роботи за вхідною напругою, що зменшує їх універсальність у системах із сильно змінними параметрами джерела енергії. Через це Z-джерельні інвертори найчастіше застосовуються у системах із стабільним живленням або у спеціалізованих промислових установках, де режим роботи заздалегідь визначений та контрольований. Параметри інвертора: вхідна напруга 50 – 250 В, вихідна напруга 120 В, номінальна потужність 950 Вт, частота 5 Гц, час перемикання 0,05 (рис. 2.8).

Для системного та порівняльного аналізу однокаскадних інверторних рішень широко застосовуються узагальнені порівняльні таблиці, які дозволяють оцінити не лише енергетичну ефективність, але й сукупність таких параметрів, як потужнісні характеристики, частотні режими роботи,

рівень комутаційних втрат, складність топології та вимоги до системи керування.

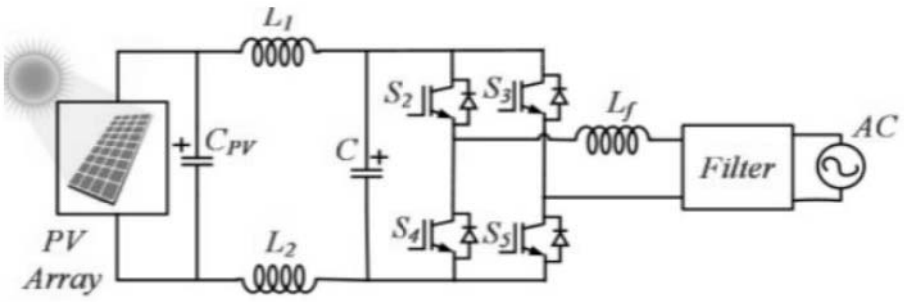


Рисунок 2.8 – Однофазний інвертор з Z-подібним джерелом

Аналіз отриманих результатів свідчить, що найвищі показники енергоефективності демонструють buck-boost топології, оскільки вони забезпечують оптимальний баланс між гнучкістю керування, здатністю адаптації до змін вхідної напруги та ефективністю перетворення енергії. Це робить їх найбільш універсальними для застосування у фотоелектричних системах змінної потужності.

У свою чергу, Z-джерельні інвертори характеризуються більш простою структурою, меншою кількістю активних компонентів та потенційно нижчою вартістю реалізації. Однак ці переваги компенсуються обмеженим діапазоном вхідної напруги та меншою універсальністю у порівнянні з buck-boost рішеннями.

Таким чином, вибір оптимальної топології інвертора повинен здійснюватися на основі комплексного техніко-економічного аналізу, який враховує не лише показники ефективності, але й умови експлуатації, вимоги до надійності, рівень складності системи керування та загальну вартість реалізації енергетичної установки.

Загалом, порівняльний аналіз інверторних топологій, представлений у джерелах, може бути використаний для розробки критеріїв вибору інверторних схем для різних застосувань. Вибір конкретної топології

залежить від застосування та вимог, включаючи ефективність, вартість та інші характеристики [5].

Мікроінвертори є одним із найбільш сучасних та активно розвиваючихся напрямів у сфері фотоелектричних систем, що базуються на концепції розподіленого енергоперетворення. У таких системах кожен фотоелектричний модуль оснащується власним інвертором, який безпосередньо виконує функцію перетворення електроенергії з постійного струму (DC) у змінний струм (AC).

Така архітектура дозволяє кожній сонячній панелі працювати незалежно від інших елементів системи, що суттєво підвищує загальну гнучкість та адаптивність енергетичної установки. У випадку часткового затінення, забруднення або деградації одного модуля, інші продовжують працювати в штатному режимі без зниження загальної продуктивності системи.

Ключовою перевагою мікроінверторів є значне підвищення надійності та відмовостійкості фотоелектричної системи. Відмова одного інвертора не призводить до виходу з ладу всієї станції, що особливо важливо для розподілених енергетичних систем та критичних об’єктів енергопостачання.

Додатково мікроінвертори забезпечують індивідуальний моніторинг кожної панелі, що дозволяє реалізувати більш точні алгоритми керування точкою максимальної потужності (MPPT) на рівні окремого модуля. Це підвищує загальну ефективність системи та дозволяє максимально використовувати потенціал кожного фотоелектричного елемента.

Ще однією важливою перевагою є суттєве спрощення монтажу та інфраструктури. Відсутність централізованих інверторних блоків, довгих ліній постійного струму високої напруги та складних схем розподілу енергії знижує вимоги до проєктування, скорочує час встановлення та спрощує подальше технічне обслуговування.

Таблиця 1.3. – Порівняльне дослідження характеристик однокаскадних інверторних топологій

Тип інвертора	Вхідна напруга, В	Вихідна напруга, В	Номінальна потужність, Вт	Частота, Гц	Час перемикання, с	Продуктивність, %
Універсальний одноступеневий мережевий інвертор	**16,8**	**110**	**200**	**10**	**0,1**	**70**
Однокаскадний інвертор з buck-boost	**200 – 350**	**230**	**1000**	**–**	**–**	**93,6**
Антипаралельний інвертор з двома джерелами живлення	**40 – 50**	**90 – 110**	**500**	**9,2**	**0,092**	**80 – 90**
Однофазний інвертор з Z подібним джерелом	**50 – 250**	**120**	**950**	**5**	**0,05**	**–**

Водночас основним недоліком мікроінверторних систем залишається їх вища вартість у порівнянні зі стрінговими або централізованими інверторами. Це пов’язано з необхідністю встановлення окремого силового перетворювача на кожен модуль, що збільшує загальну кількість обладнання. Саме тому мікроінвертори найбільш широко застосовуються у приватних домогосподарствах, малих комерційних об’єктах та системах розподіленої генерації, де переваги у вигляді надійності, гнучкості та простоти обслуговування переважають фактор вартості.

2.4 Розробка інвертора

У структурі фотоелектричної системи для кожної сонячної панелі передбачено окремий мікроінвертор. Такий підхід забезпечує незалежну роботу кожного модуля та підвищує ефективність системи, особливо в умовах нерівномірного освітлення або часткового затінення. Тому в системі, що складається з N сонячних панелей, використовується N мікроінверторів. Однією з основних функцій мікроінвертора є синхронізація з електричною мережею. Для коректної передачі електроенергії вихідна напруга інвертора повинна відповідати параметрам мережі за величиною, частотою та фазою. У проєктованому пристрої ця задача реалізується за допомогою системи фазового автопідлаштування частоти PLL.

Для покращення якості електроенергії між інверторним каскадом і мережею встановлюється вихідний фільтр, який зменшує рівень вищих гармонік та забезпечує більш синусоїдальну форму вихідної напруги . Напруга, що виробляється однією фотоелектричною панеллю, зазвичай знаходиться в межах від 12 до 36 В, тому для її подальшого використання необхідне підвищення до рівня 370–400 В, який є типовим для однофазних мережевих мікроінверторів.

Інверторний каскад реалізований за схемою Н-моста із застосуванням MOSFET-транзисторів як силових ключів. Для зменшення втрат потужності можуть використовуватися гібридні методи керування з комутацією при нульовій напрузі або нульовому струмі, що підвищує загальний ККД пристрою. У деяких конструкціях також застосовуються ізольовані трансформаторні схеми, які забезпечують гальванічну розв’язку та додаткове підвищення напруги.

На сьогодні існує значна кількість топологій мережевих мікроінверторів. У даній роботі обрано структуру з підвищувальним перетворювачем постійного струму, яка забезпечує необхідний рівень напруги та високу ефективність роботи. Для дослідження характеристик

запропонованої системи проведено моделювання, зокрема в умовах часткового затінення фотоелектричних панелей (рис. 2.9).

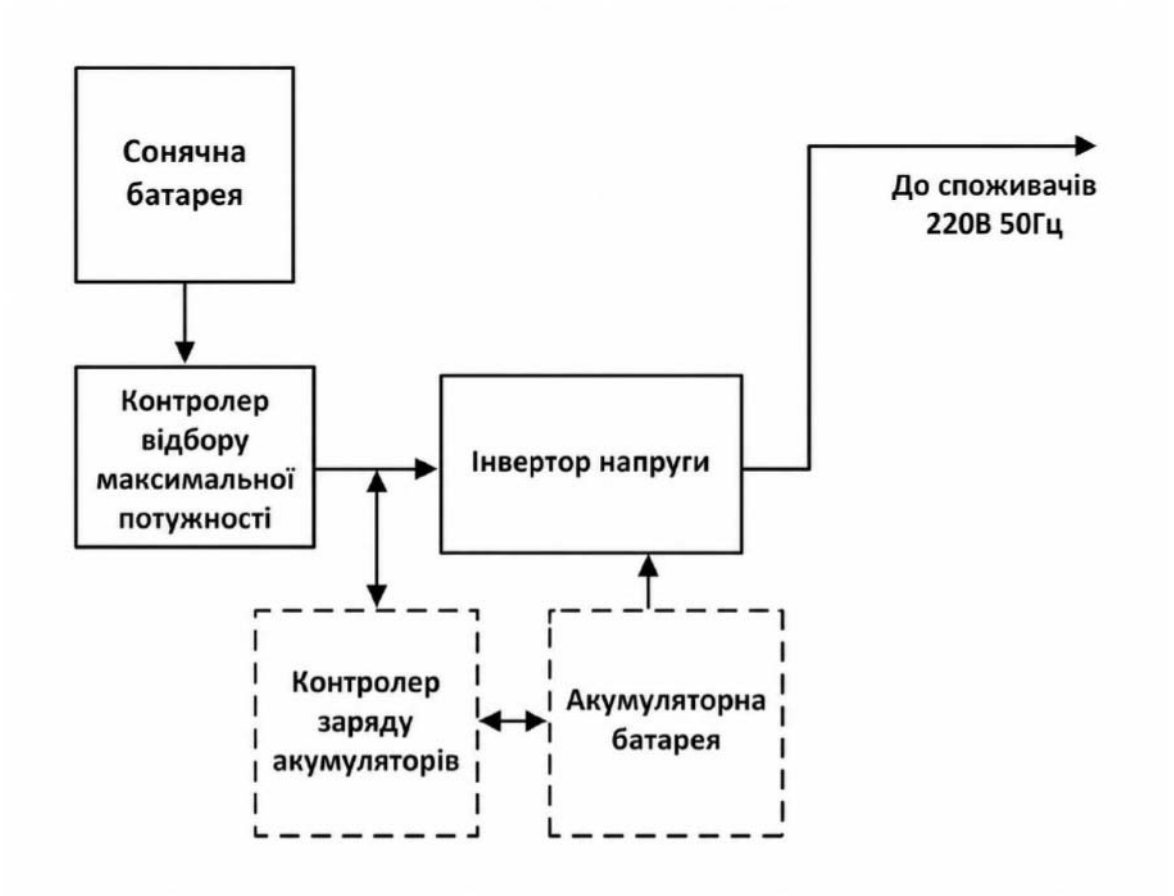


Рисунок 2.9 – Структурна схема мікроінвертора

Автономні інвертори призначені для роботи в системах електроживлення, які не мають підключення до централізованої електричної мережі. Джерелом енергії для таких інверторів є акумуляторні батареї, що накопичують електроенергію, вироблену сонячними панелями. Енергія від фотоелектричних модулів використовується як для заряджання акумуляторів, так і для живлення підключеного навантаження. Надійна робота автономного інвертора значною мірою залежить від дотримання умов експлуатації, оскільки перевантаження, неправильний режим заряджання або глибокий розряд акумуляторів можуть призвести до виходу з ладу як батарей, так і самого інвертора.

Основним призначенням пристрою є перетворення постійної напруги акумуляторної батареї у змінну напругу, придатну для живлення побутових електроприладів. Для заряджання акумулятора необхідне окреме джерело постійного струму, яким у сонячних енергетичних системах виступає фотоелектрична панель або контролер заряду (рис 2.10).

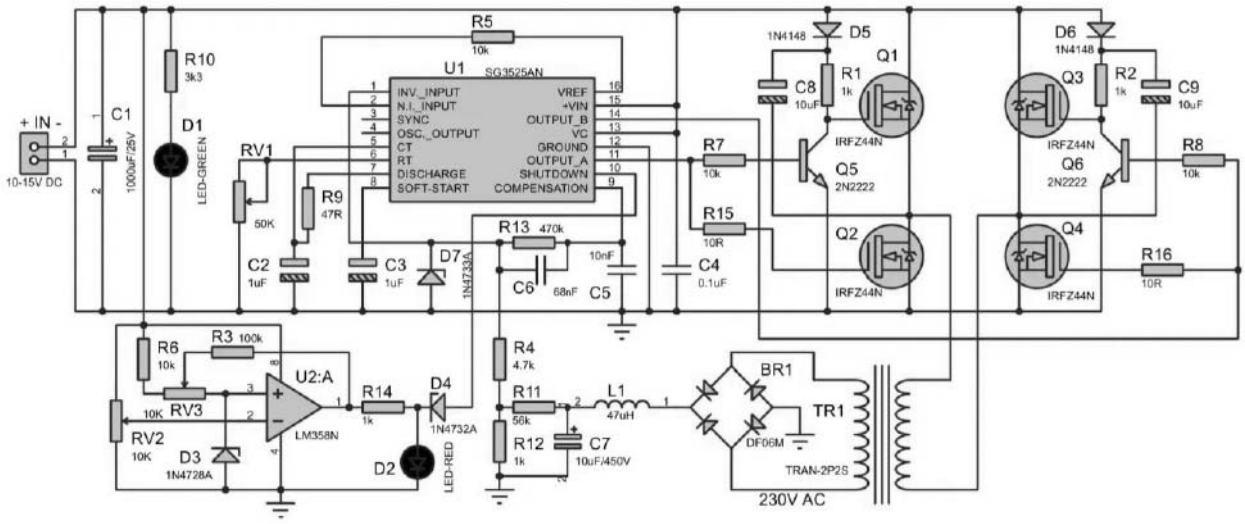


Рисунок 2.10 – Принципова електрична схема автономного інвертора

У схемі потрібно використовувати інтегральний стабілізатор напруги LM317, який забезпечує плавне регулювання вихідної напруги в широкому діапазоні – від 1,25 В до 37 В при струмі навантаження до 1,5 А. Цей елемент використовується для стабілізації напруги та підтримання необхідного режиму заряджання акумуляторної батареї. Як накопичувач енергії застосовується свинцево-кислотний акумулятор (SLA) напругою 12 В і ємністю 4,5 А·год, який забезпечує живлення інвертора постійним струмом.

Одним із ключових вузлів схеми є силовий трансформатор T1 із середньою точкою вторинної обмотки. Трансформатор має параметри 230 В / 9-0-9 В та номінальний струм 1,5 А. Його основною функцією є підвищення напруги та формування вихідної змінної напруги необхідного рівня. Для захисту підключеного обладнання від перенапруг у схемі використовується

металооксидний варистор (MOV), який обмежує імпульсні перенапруги та підвищує надійність роботи системи.

Напруга від сонячної панелі подається на стабілізатор LM317, вихід якого налаштований на рівень 12 В, необхідний для заряджання акумуляторної батареї. Підключення акумулятора здійснюється через діод Шоткі, який запобігає зворотному протіканню струму та зменшує втрати енергії завдяки низькому падінню напруги на переході.

Після ввімкнення схеми запускається генератор імпульсів на базі мікросхеми CD4047, налаштованої в режимі астабільного мультивібратора. На її виходах формуються два протифазні сигнали, які керують роботою силових MOSFET-транзисторів IRF540. Транзистори почергово комутують струм через обмотки трансформатора, унаслідок чого на його виході формується змінна напруга. Значення вихідної напруги визначається коефіцієнтом трансформації та частотою перемикання силових ключів.

Автономний сонячний інвертор виконує функцію перетворення постійного струму, отриманого від акумуляторної батареї, у змінний струм для живлення споживачів. Залежно від схеми керування на виході можуть формуватися прямокутна, модифікована синусоїдальна або чиста синусоїдальна напруга. Такі інвертори широко застосовуються для живлення освітлювальних приладів, телевізорів, комп'ютерної техніки, електродвигунів та іншого побутового обладнання в автономних сонячних електростанціях.

Зворотний зв'язок у принциповій електричній схемі, наведеної на рисунку 2.11, реалізований через вихід ТОМП та систему резистивних дільників напруги R11–R13, R14, R15 і R18. За допомогою цих елементів сигнал з виходу інвертора подається на аналого-цифрові входи мікроконтролера DD1. Завдяки цьому мікроконтролер безперервно контролює рівень вихідної напруги та автоматично коригує шпаруватість сигналів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), підтримуючи стабільні параметри роботи інвертора.

У випадках, коли потужності сонячної батареї недостатньо для забезпечення необхідного рівня вихідної напруги, наприклад під час хмарної погоди або в нічний час, мікроконтролер формує керуючий сигнал на додатковому виході (8). Це дозволяє перевести контролер заряду в режим примусового живлення навантаження від акумуляторної батареї, забезпечуючи безперервну роботу споживачів.

Для живлення електронних компонентів у схемі застосовано два окремі стабілізатори напруги. Перший призначений для живлення мікроконтролера DD1 і виконаний на базі інтегрального стабілізатора LM317 (DA2), який формує стабільну напругу 5 В. Другий стабілізатор забезпечує живлення драйверів керування силовими транзисторами DA3–DA6 та реалізований на інтегральній схемі DA1 з вихідною напругою 12 В. Загальний струм споживання допоміжних кіл не перевищує 0,1 А, що позитивно впливає на енергоефективність пристрою.

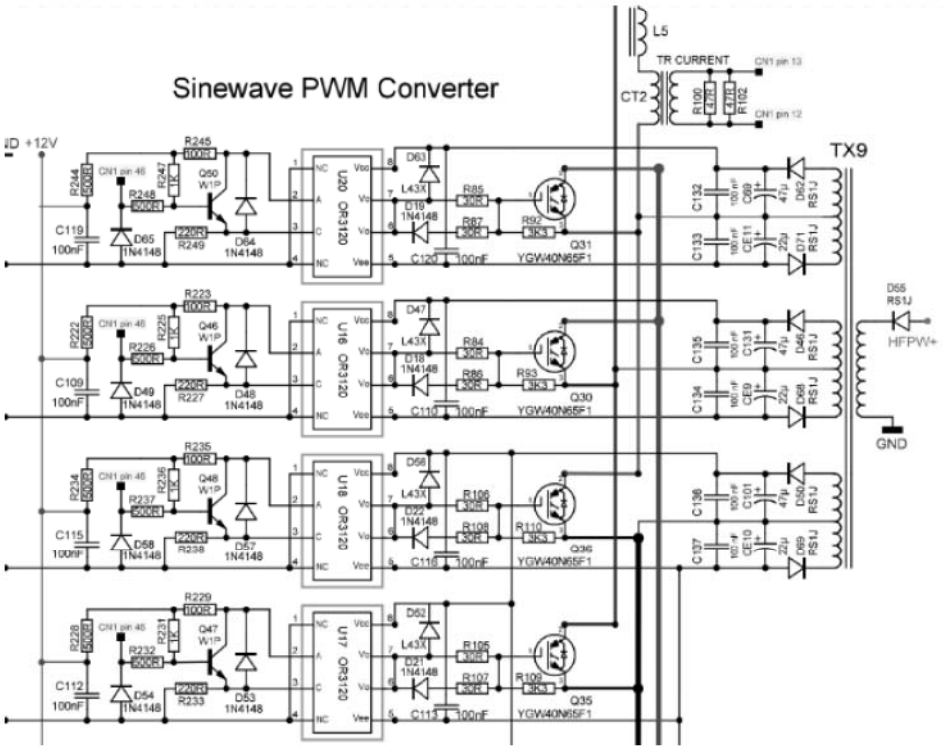


Рисунок 2.11 – Фрагмент схеми електричної принципової

Живлення обох стабілізаторів здійснюється від параметричного стабілізатора, побудованого на баластному резисторі R1 та стабілітроні VD1. Цей вузол забезпечує зниження вхідної напруги до рівня близько 25 В і підключений до виходу контролера заряду. Через незначне споживання струму втрати потужності на резисторі R1 є мінімальними та практично не впливають на загальний коефіцієнт корисної дії інвертора.

3.МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РОБОТИ ІНВЕРТОРА

3.1 Моделювання Н-моста з ШІМ

На початковому етапі дослідження було розроблено та змодельовано класичну структуру повномостового інвертора (Н-міст), реалізованого на основі польових транзисторів (MOSFET), що є одним із найпоширеніших рішень у сучасній силовій електроніці завдяки простоті реалізації та високій ефективності при роботі на середніх і високих частотах.

Основною метою даного етапу було створення базової функціональної моделі інвертора, яка дозволяє дослідити вплив широтно-імпульсної модуляції (ШІМ, SPWM) на форму вихідної напруги, спектральний склад сигналу та рівень гармонічних спотворень.

Схема була реалізована у середовищі моделювання із застосуванням драйвера затворів IR2110, який забезпечує керування верхніми та нижніми ключами Н-моста та формування необхідних рівнів керуючих сигналів для силових транзисторів.

У даній моделі сигнали керування, які в реальних системах формуються мікроконтролером, були замінені джерелами напруги, описаними кусково-лінійними функціями. Таке наближення дозволило спростити модель на етапі аналізу та зосередитися на електричних процесах у силовій частині інвертора. Функції керуючих сигналів були сформовані на основі даних, отриманих за допомогою інструменту Serial Plotter у середовищі Arduino IDE, що дозволило відтворити реалістичну структуру SPWM-сигналів (рис.3.1).

Результати моделювання (рис. 3.2) демонструють характерну структуру сигналу SPWM, де ширина імпульсів змінюється пропорційно миттєвому значенню синусоїдального опорного сигналу. Це підтверджує

коректність реалізації алгоритму широтно-імпульсної модуляції та правильність роботи силового каскаду.

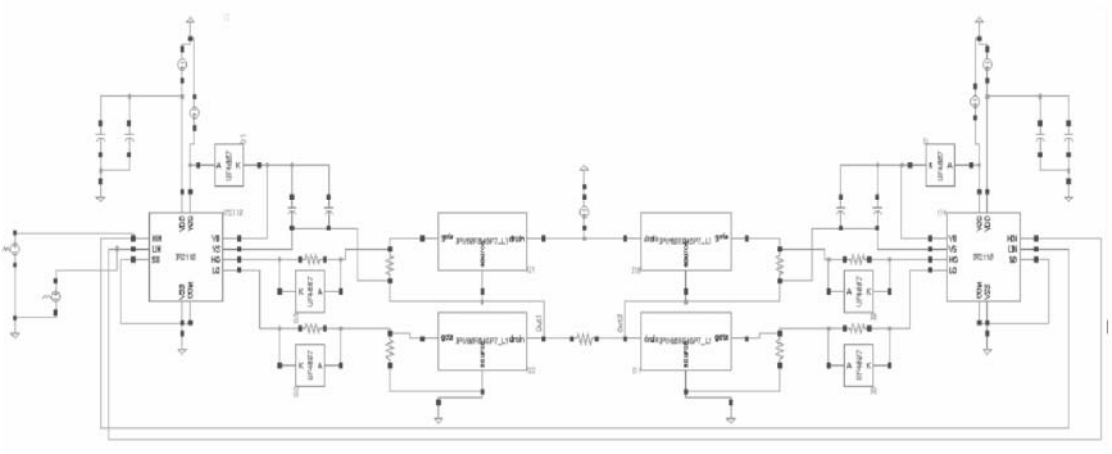


Рисунок 3.1 – Схема початкової моделі інвертора на базі H-моста у Cadence Virtuoso

Подальший спектральний аналіз вихідної напруги (рис. 3.3) показав наявність основної гармоніки на частоті 50 Гц, яка відповідає промисловій частоті електричної мережі. Окрім цього, у спектрі спостерігаються додаткові високочастотні складові, зокрема на частоті близько 5 кГц, що відповідає частоті несучого трикутного сигналу ШІМ.

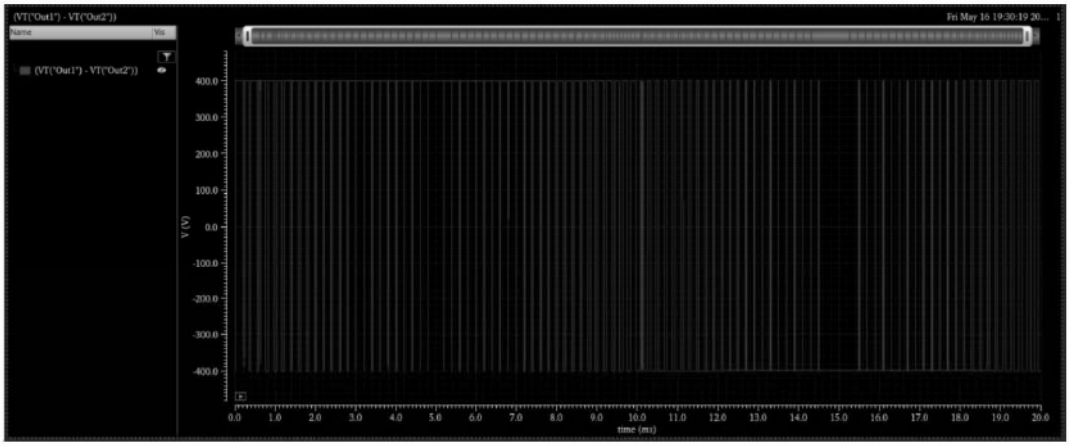


Рисунок 3.2 – Результати моделювання оновленої моделі H-моста з урахуванням SPWM-керування

Наявність таких гармонік є типовою для несфільтрованих інверторних виходів і обумовлює необхідність застосування фільтрувальних елементів для отримання якісної синусоїдальної форми напруги, придатної для живлення чутливих навантажень або синхронізації з електромережею.

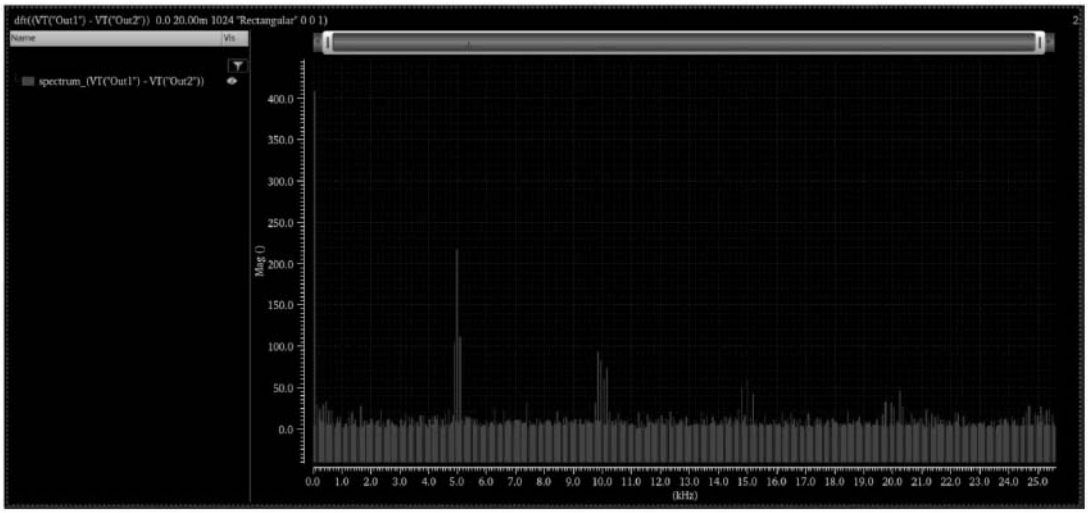


Рисунок 3.3 – Спектр вихідної напруги Н-мост

3.2 Моделювання LCL-фільтра

Для покращення якості вихідної напруги та ефективного придушення високочастотних гармонічних складових, що виникають у процесі широтно-імпульсної модуляції, було розроблено LCL-фільтр. Дана структура фільтра є однією з найбільш ефективних у силовій електроніці завдяки високій крутизні спаду амплітудно-частотної характеристики та здатності ефективно пригнічувати гармоніки в широкому частотному діапазоні.

Параметри LCL-фільтра підбиралися з урахуванням частоти комутації силових ключів, характеристик навантаження та вимог до рівня згладжування вихідного сигналу. Особливу увагу приділено забезпеченню балансу між ефективністю фільтрації та стабільністю системи.

На рис. 3.4 наведено електричну схему LCL-фільтра, змодельовану у середовищі Cadence Virtuoso при активному навантаженні 230 Ом. Отримані результати амплітудно-частотної характеристики (рис. 3.5) показують, що

частота зрізу становить приблизно 300 Гц, що є достатнім для ефективного придушення високочастотних гармонік, пов’язаних із частотою ШІМ.

У смузі пропускання коефіцієнт передачі напруги наближається до одиниці, що свідчить про мінімальні втрати корисного сигналу та високу ефективність роботи фільтра.

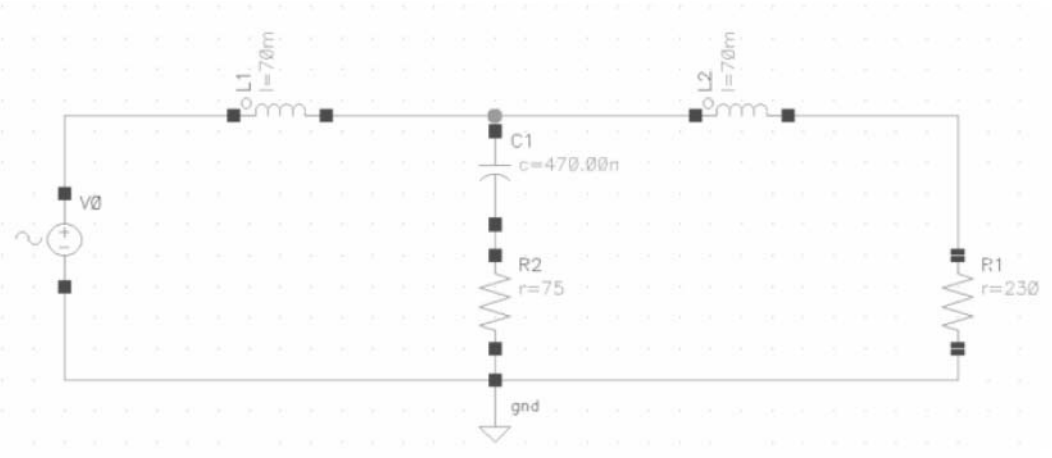


Рисунок 3.4 – Схема LCL-фільтра при опорі навантаження 230 Ом

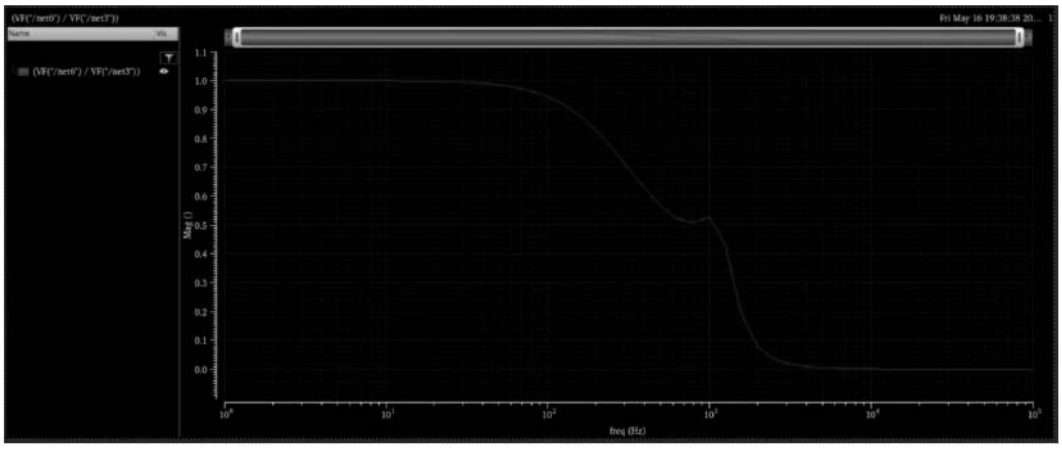


Рисунок 3.5 – Результати моделювання схеми LCL-фільтра при опорі навантаження 230 Ом

Додатково було проведено моделювання фільтра при зміненому навантаженні 500 Ом (рис. 3.6). Отримані результати АЧХ (рис. 3.7) показали зміщення частоти зрізу приблизно до 1,2 кГц, що пов’язано зі зміною умов навантаження та впливом еквівалентного опору на динаміку фільтра.

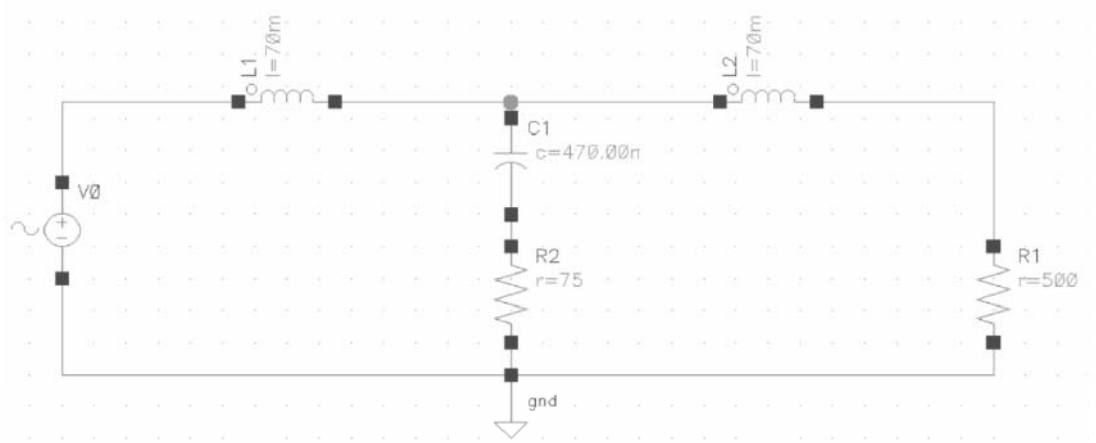


Рисунок 3.6 – Схема LCL-фільтра у середовищі Cadence Virtuoso при опорі навантаження 500 Ом

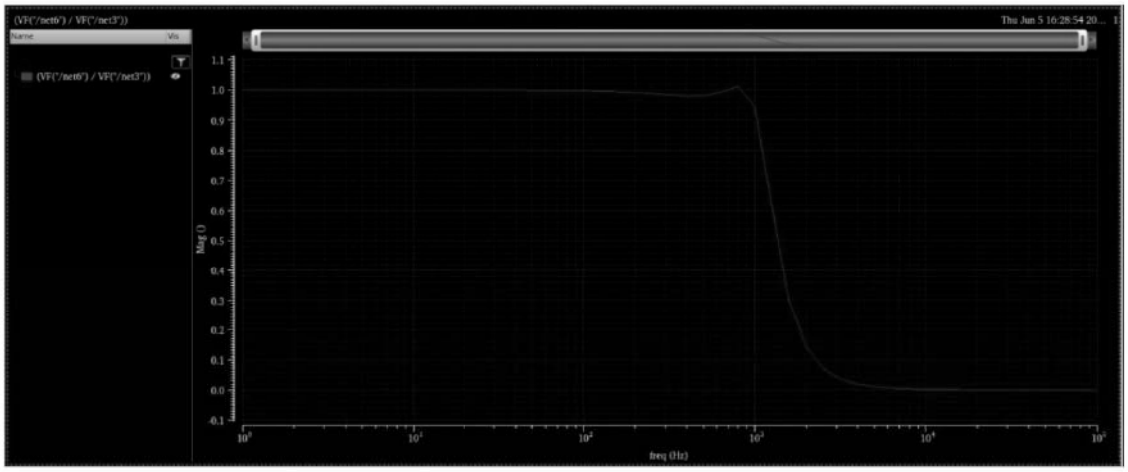


Рисунок 3.7 – Результати моделювання схеми LCL-фільтра при при опорі навантаження 500 Ом

Незважаючи на зміну частотних характеристик, фільтр зберігає здатність ефективно пригнічувати високочастотні складові поблизу частоти несучого сигналу, що підтверджує його адаптивність до змінних умов роботи.

3.3 Аналіз часових та частотних характеристик інвертора

Наступним етапом дослідження стало об’єднання раніше розроблених підсистем — Н-моста та LCL-фільтра — в єдину інтегровану модель

інвертора. До системи також було додано алгоритм широтно-імпульсної модуляції (SPWM), що дозволило отримати повноцінну модель автономного інверторного перетворювача.

Інтегрована схема з навантаженням 230 Ом(рис. 3.8). Результати моделювання (рис. 3.9) показали, що вихідна напруга наближається до синусоїдальної форми, що свідчить про коректну роботу всієї системи в цілому — від формування керуючих імпульсів до фільтрації високочастотних складових.

Спектральний аналіз вихідної напруги (рис. 3.10) показав, що після застосування LCL-фільтра високочастотні складові значно пригнічені, а основна енергетична складова зосереджена на частоті 50 Гц, що відповідає вимогам стандартної електричної мережі.

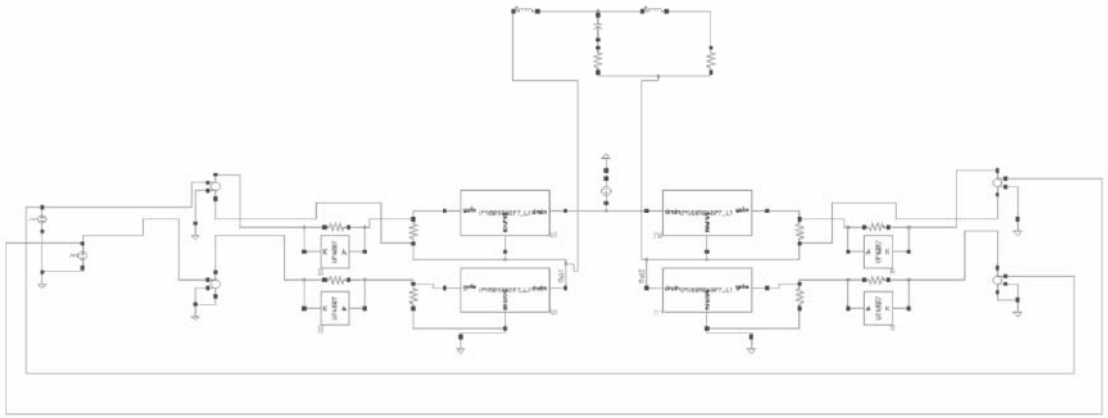


Рисунок 3.8 – Схема Н-моста з підключеним LCL-фільтром

Разом із тим, визначений коефіцієнт нелінійних спотворень (THD) становить близько 20%, що свідчить про необхідність подальшої оптимізації фільтрувальної частини або вдосконалення алгоритмів ШІМ. Зокрема, перспективним напрямком є використання багаторівневих фільтрів або активних фільтраційних структур, які дозволяють додатково зменшити рівень гармонік.

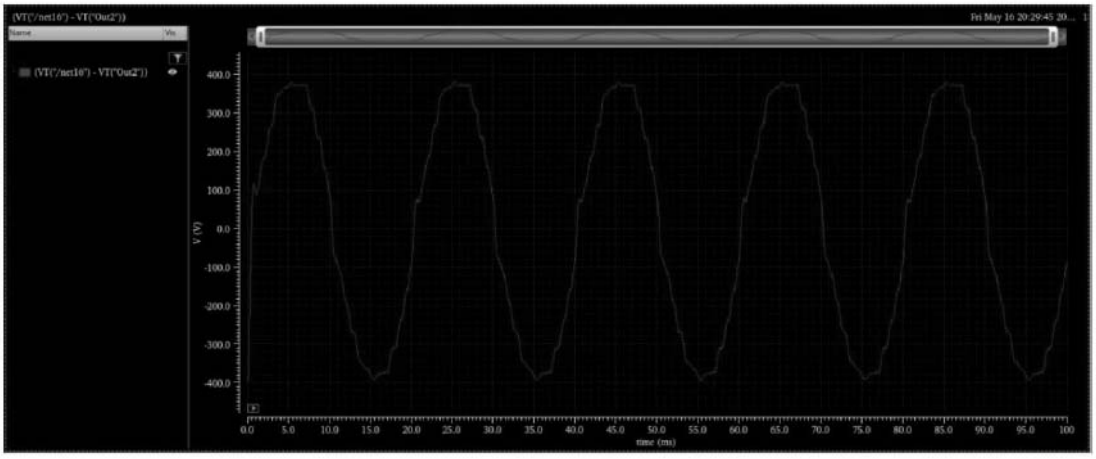


Рисунок 3.9 – Результат моделювання схеми Н-моста з підключеним LCLфільтром що схожий на синусоїдальний сигнал при опорі навантаження 230 Ом

Також було встановлено, що амплітуда вихідної напруги становить приблизно 370 В. Для приведення її до нормативного значення 325 В необхідно коригування індексу модуляції ШІМ, що може бути реалізовано програмно в мікроконтролері без зміни апаратної частини.

При збільшенні опору навантаження до 500 Ом (рис. 3.11) спостерігається зміна динаміки вихідного сигналу. Незважаючи на збереження синусоїдальної форми, спектральний аналіз (рис. 3.12) показав появу додаткових гармонік у діапазоні приблизно 450 та 650 Гц, що пов’язано зі зміною умов узгодження фільтра та навантаження.

Крім того, зафіксовано збільшення коефіцієнта нелінійних спотворень до рівня близько 25%, що підтверджує чутливість системи до параметрів навантаження та необхідність адаптивного налаштування фільтраційних елементів у різних режимах роботи.

Отримані результати моделювання дозволили комплексно оцінити ефективність запропонованого підходу. Використання SPWM у поєднанні з LCL-фільтром забезпечує суттєве покращення якості вихідного сигналу, що підтверджується як часовими характеристиками, так і результатами спектрального аналізу.

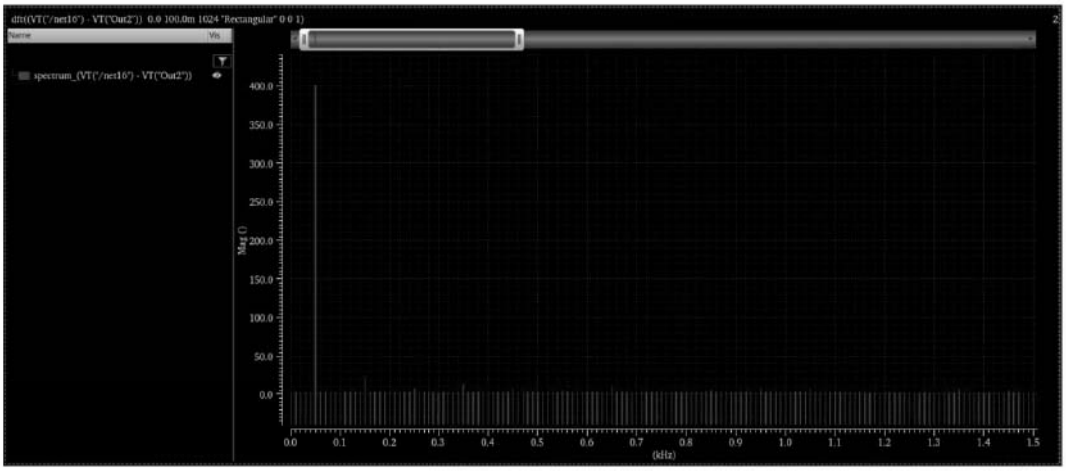


Рисунок 3.10 – Спектр вихідної напруги інвертора при опорі навантаження 230 Ом

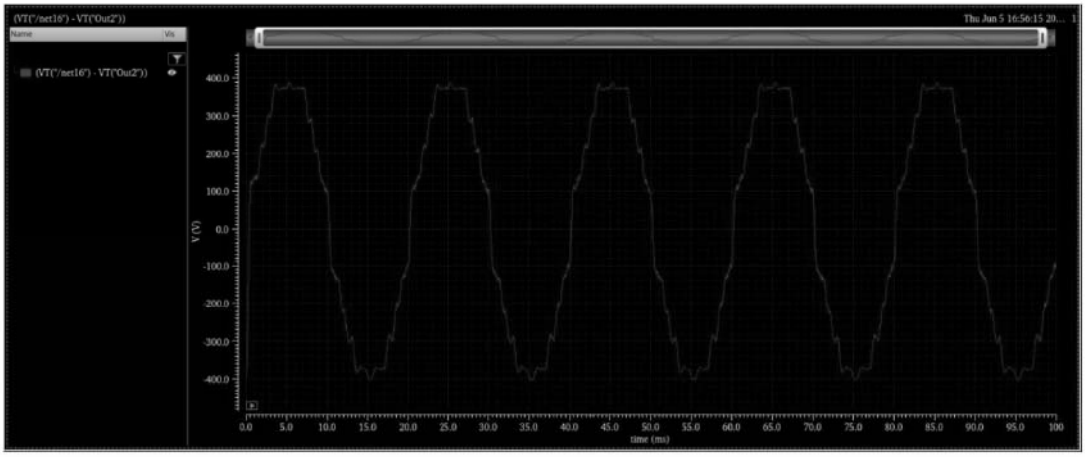


Рисунок 3.11 – Результат моделювання схеми Н-моста з підключеним LCLфільтром що схожий на синусоїдальний сигнал при опорі навантаження 500 Ом

Водночас проведене дослідження показало, що для подальшого зниження рівня гармонічних спотворень необхідно розглядати більш складні фільтрувальні структури або вдосконалені методи модуляції, що може бути напрямком подальших наукових досліджень.

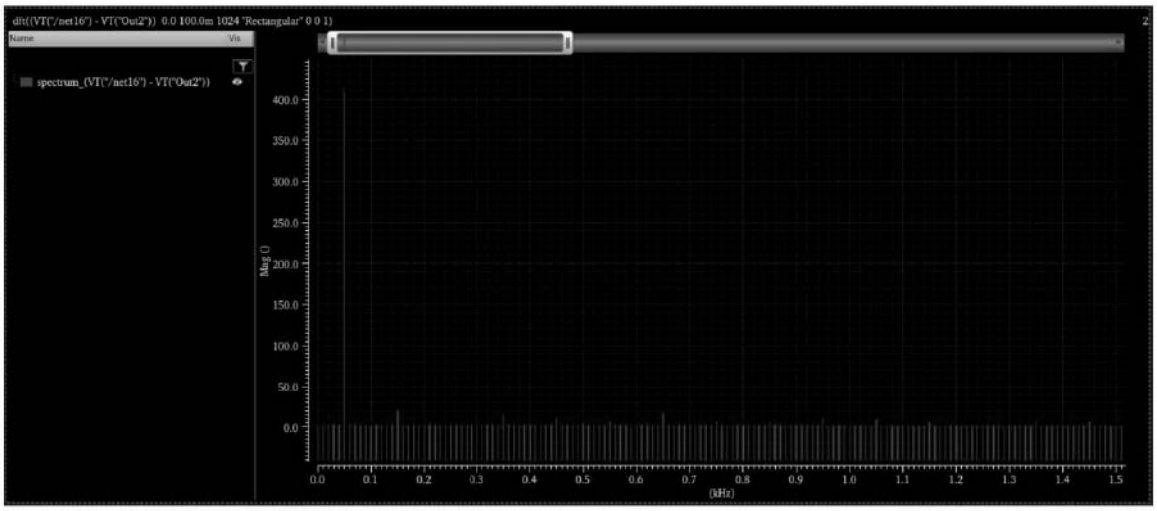


Рисунок 3.12 – Спектр вихідної напруги інвертора при опорі навантаження 500 Ом

3.4 Реалізація системи керування.

Перевірка працездатності системи керування автономної фотоелектричної (PV) сонячної установки була виконана на демонстраційній відладочній платі STM32F4DISCOVERY, яка базується на мікроконтролері STM32F407VG. Даний мікроконтролер побудований на основі архітектури ядра ARM Cortex-M4.

Сімейство процесорів ARM Cortex відноситься до сучасного покоління мікропроцесорних ядер, які розроблені відповідно до стандартизованої архітектури та можуть бути адаптовані під широкий спектр технічних застосувань. На відміну від класичних рішень ARM попередніх поколінь, ядра Cortex є повноцінними інтегрованими процесорними платформами, які поєднують обчислювальне ядро, системну архітектуру, а також набір периферійних інтерфейсів, що забезпечує високу ефективність розробки вбудованих систем.

Мікроконтролери серії STM32, побудовані на базі Cortex-M4, спеціально орієнтовані на застосування в системах, де необхідне поєднання високої продуктивності та низького енергоспоживання. Особливістю даної

архітектури є наявність розширених обчислювальних можливостей, включаючи апаратну підтримку операцій з плаваючою комою, що суттєво підвищує швидкодію алгоритмів керування.

Додатковою перевагою є наявність до 12 таймерів із підтримкою генерації широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що є критично важливим для керування силовими перетворювачами. Також мікроконтролер оснащений швидкодіючими АЦП (аналогово-цифровими перетворювачами), що дозволяє здійснювати точне вимірювання параметрів системи в режимі реального часу. У сукупності ці характеристики забезпечують високу точність, стабільність та швидкість реакції системи керування (рис 3.12).



Рисунок 3.12 – Плата STM32F4DISCOVERY

Основною функцією розробленого контролера є реалізація алгоритму відбору максимальної потужності від сонячної батареї (СБ) на основі методу TWC (Two-Weight Control), а також формування синусоїдальних ШІМ-сигналів, які використовуються для керування інверторним каскадом. Таким чином, мікроконтролер виконує одночасно задачі оптимізації енергозбору та генерації керуючих імпульсів для силової частини системи.

Осцилограми роботи перетворювача потужності (ПП), який функціонує під керуванням алгоритму TWC у статичному режимі роботи фотоелектричної системи (рис.3.13). Отримані осцилограми демонструють

стабільність роботи системи та коректність формування керуючих сигналів у заданих умовах навантаження (рис 3.14).

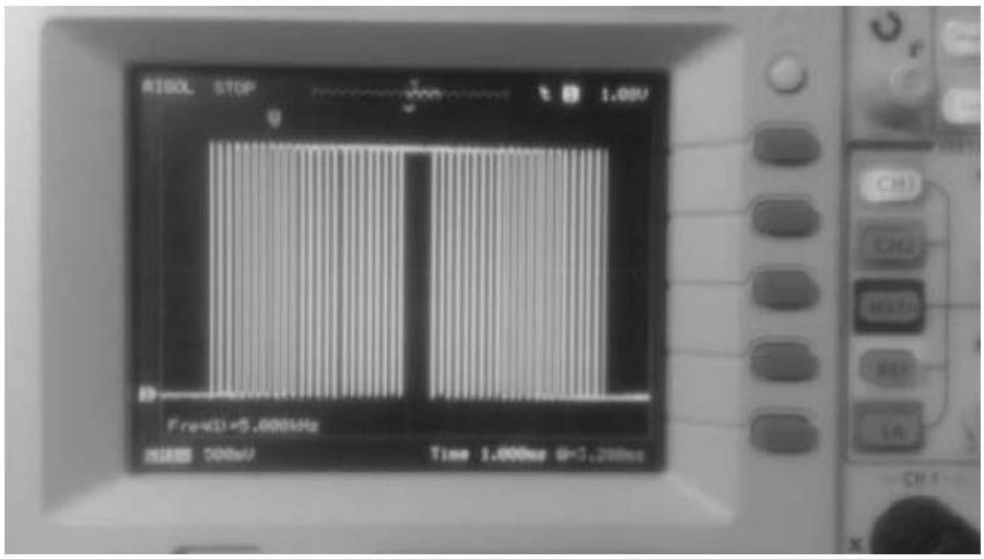


Рисунок 3.13 – Осцилограма роботи ПП

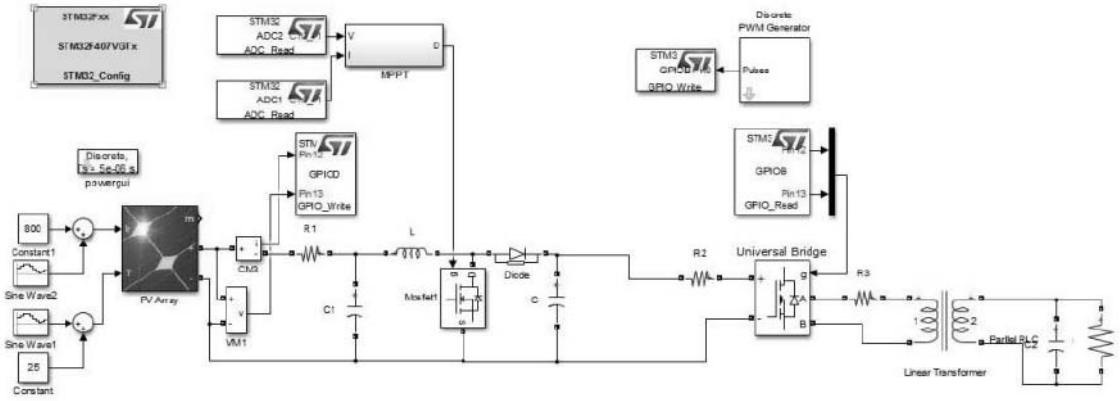


Рисунок 3.14 Модель сонячної PV-системи з системою керування на основі мікроконтролера STM32F407VG

Розроблене програмне забезпечення має потенціал для подальшого використання у складі імітаційних моделей автономних сонячних PV-систем у середовищі для моделювання. Зокрема, інтеграція мікроконтролерного керування дозволяє більш точно відтворювати реальні процеси

енергоперетворення та оцінювати ефективність алгоритмів керування в умовах змінного навантаження та нестабільної генерації [3].

4. КОНСТРУКТОРСЬКО ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Конструкція інвертора

У конструкції автономного інвертора також передбачено систему звукової сигналізації на основі випромінювача . Вона використовується для оповіщення користувача про виникнення аварійних режимів роботи, а також для індикації зміни режимів функціонування інвертора.

Для розміщення електронних компонентів інвертора було розроблено креслення корпусу (рис4.1), яке забезпечує надійне кріплення всіх функціональних вузлів, зручність монтажу та безпечну експлуатацію пристрою. Корпус виконує не лише механічну, але й захисну функцію, оберігаючи електронні компоненти від пилу, вологи та випадкових механічних пошкоджень.

Всередині корпусу передбачено місця для встановлення друкованої плати керування, силових MOSFET-транзисторів, драйверів керування, трансформатора, радіаторів охолодження та клем підключення зовнішніх пристроїв. Розташування елементів виконано таким чином, щоб забезпечити мінімальну довжину силових з'єднань та знизити рівень електромагнітних завад.

У центральній частині корпусу розміщено друковану плату з мікроконтролером та допоміжними електронними компонентами. Силові транзистори встановлені на алюмінієвих радіаторах, які закріплені на бічних стінках корпусу для ефективного відведення тепла під час роботи інвертора. Трансформатор розташований у нижній частині конструкції, що дозволяє рівномірно розподілити вагу пристрою та підвищити його механічну стійкість.

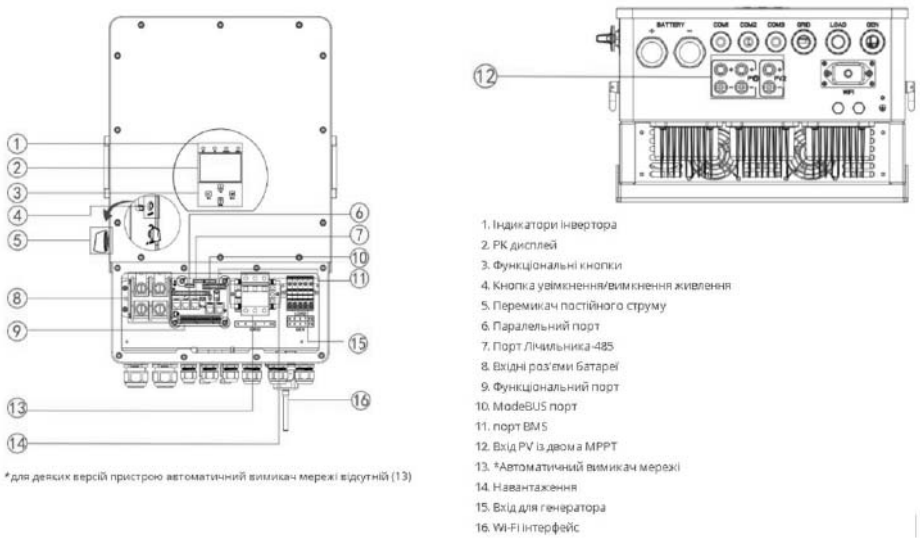


Рисунок 4.1 – Конструкція корпусу інвертора

На передній панелі корпусу знаходяться елементи індикації та керування: вимикач живлення, світлодіодні індикатори режимів роботи та аварійних станів, а також звуковий випромінювач для сигналізації. На задній панелі розташовані клеми підключення акумуляторної батареї, сонячної панелі та виходу змінної напруги до навантаження.

Для забезпечення необхідного температурного режиму в корпусі передбачені вентиляційні отвори, які сприяють природній циркуляції повітря. За необхідності конструкція допускає встановлення додаткового вентилятора примусового охолодження.

Розроблена конструкція корпусу забезпечує компактне розміщення всіх елементів інвертора, спрощує процес складання та технічного обслуговування пристрою, а також підвищує надійність його роботи в умовах тривалої експлуатації.

Заземлення інвертора:

Одним із важливих елементів забезпечення електробезпеки під час експлуатації інвертора є система заземлення (рис4.2). Її основним призначенням є захист людей та обладнання від ураження електричним струмом у разі пошкодження ізоляції або виникнення аварійних режимів

роботи. Крім того, заземлення сприяє зниженню рівня електромагнітних завад та підвищує надійність функціонування електронних пристроїв.

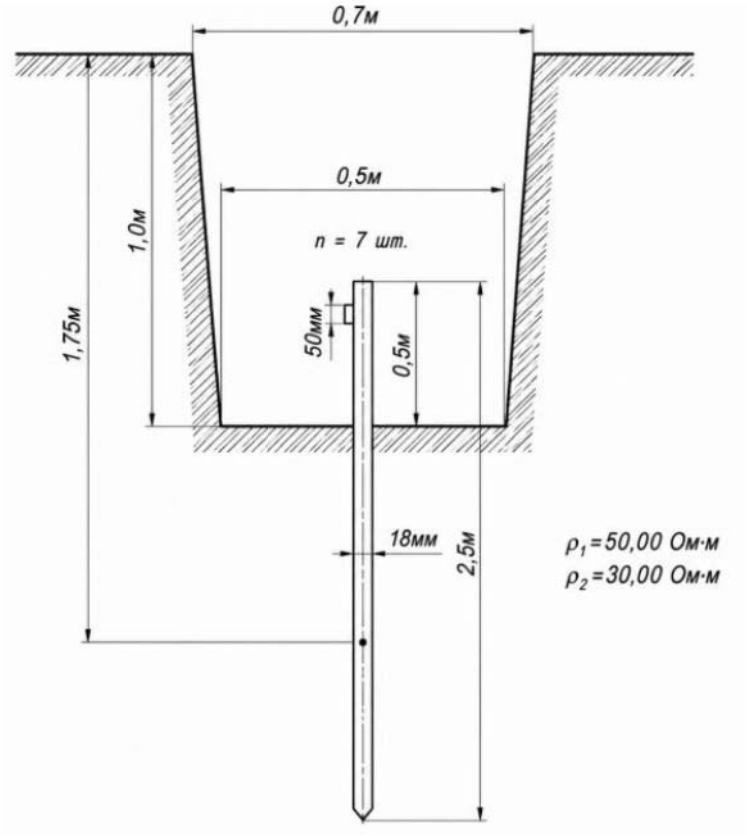


Рисунок 4.2 – Установка одиночного заземлювача в крупнозернистому піску з валунами

У розробленій конструкції інвертора всі металеві частини корпусу, які можуть опинитися під небезпечною напругою внаслідок пошкодження ізоляції, підключаються до захисного заземлювального провідника. Це дозволяє забезпечити швидке спрацювання захисних пристроїв та виключити появу небезпечної напруги на корпусі обладнання.

Заземлювальний провідник підключається до спеціального контакту на корпусі інвертора та з'єднується із зовнішнім контуром заземлення. Для забезпечення надійного електричного контакту використовуються болтові з'єднання з антикорозійним покриттям. Переріз заземлювального провідника

вибирається відповідно до потужності обладнання та вимог чинних нормативних документів.

Особлива увага приділяється заземленню корпусів сонячних панелей, металевих опорних конструкцій та силового обладнання автономної сонячної електростанції. Об'єднання всіх металевих елементів у єдину систему вирівнювання потенціалів значно підвищує рівень електробезпеки та зменшує ризик пошкодження обладнання під час грозових перенапруг.

Наявність ефективної системи заземлення забезпечує безпечну експлуатацію інвертора, захищає електронні компоненти від аварійних режимів та сприяє стабільній роботі автономної сонячної електростанції протягом усього терміну служби[4].

4.2 Охорона праці та техніка безпеки при розробці та експлуатації сонячної інвертної системи

Охорона праці є невід’ємною складовою виробничої діяльності та спрямована на забезпечення безпечних і здорових умов праці працівників. При розробці, налагодженні та експлуатації інверторних систем для фотоелектричних установок особлива увага приділяється електробезпеці, пожежній безпеці, захисту від впливу електромагнітних полів та забезпеченню належних умов праці.

Система управління охороною праці на підприємстві повинна функціонувати відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці», Кодексу законів про працю України та чинних нормативних документів. Основними завданнями такої системи є виявлення небезпечних і шкідливих виробничих факторів, оцінка професійних ризиків, організація навчання персоналу та контроль за дотриманням вимог безпеки.

Працівники, які виконують монтаж, налаштування або технічне обслуговування інверторного обладнання, повинні проходити вступний та

первинний інструктажі з охорони праці, а також періодичну перевірку знань відповідно до встановленого порядку.

4.3 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Під час роботи з інверторними системами та фотоелектричними установками на персонал можуть впливати різні небезпечні та шкідливі виробничі фактори.

Основним небезпечним фактором є електричний струм. Напруга на вході та виході інвертора може становити сотні вольт, що створює ризик ураження людини електричним струмом при пошкодженні ізоляції або недотриманні правил експлуатації.

До шкідливих факторів також належать:

• підвищена температура силових елементів інвертора;

• електромагнітні поля, що створюються силовими перетворювачами;

• шум від вентиляторів систем охолодження;

• недостатнє або надмірне освітлення робочого місця;

• психологічне навантаження під час виконання налагоджувальних робіт.

Для мінімізації впливу зазначених факторів необхідно використовувати технічні та організаційні заходи захисту.

4.4 Заходи електробезпеки

Інверторні системи належать до електроустановок підвищеної небезпеки, тому забезпечення електробезпеки є одним із головних завдань під час їх експлуатації.

Для захисту персоналу від ураження електричним струмом передбачаються такі заходи:

• захисне заземлення металевих корпусів обладнання;

• використання автоматичних вимикачів та пристроїв захисного вимкнення;

• подвійна ізоляція струмопровідних частин;

• встановлення попереджувальних знаків безпеки;

• використання діелектричних рукавичок, інструментів та килимків;

• регулярний контроль стану електричних з'єднань та ізоляції.

Будь-які ремонтні або налагоджувальні роботи повинні виконуватися лише після повного відключення обладнання від джерел живлення та перевірки відсутності напруги.

4.5 Протипожежна безпека

Пожежна безпека при експлуатації інверторних систем є особливо важливою через наявність силових електронних компонентів, конденсаторів та кабельних ліній.

Для запобігання виникненню пожеж необхідно:

• використовувати кабелі відповідного перерізу;

• забезпечувати належне охолодження силових елементів;

• не допускати перевантаження обладнання;

• регулярно контролювати стан контактних з'єднань;

• використовувати автоматичні вимикачі та запобіжники.

Приміщення повинно бути оснащене первинними засобами пожежогасіння, зокрема порошковими або вуглекислотними вогнегасниками. Для електрообладнання під напругою застосування водяних вогнегасників забороняється.

4.6 Ергономічні вимоги до робочого місця

Робоче місце інженера або оператора, який здійснює проектування та моделювання інверторних систем, повинно відповідати вимогам ергономіки.

Площа робочого місця має становити не менше 6 м² на одного працівника, а об’єм приміщення — не менше 20 м³. Температура повітря повинна підтримуватися в межах 18–24 °С, відносна вологість — 40–60 %, а швидкість руху повітря — не більше 0,2 м/с.

Освітлення робочої поверхні має становити не менше 300–500 лк. Монітор комп’ютера необхідно розташовувати на відстані 50–70 см від очей користувача, а верхня межа екрана повинна знаходитися приблизно на рівні очей.

Дотримання ергономічних вимог дозволяє зменшити втому працівника, підвищити продуктивність праці та знизити ймовірність помилок під час виконання інженерних розрахунків.

4.7 Надання першої допомоги при ураженні електричним струмом

У разі ураження людини електричним струмом необхідно негайно припинити дію струму шляхом вимкнення живлення або відокремлення потерпілого від струмопровідних частин за допомогою ізолюючих предметів.

Після цього необхідно:

• оцінити стан потерпілого;

• перевірити наявність дихання та пульсу;

• викликати швидку медичну допомогу;

• за необхідності виконати серцево-легеневу реанімацію;

• контролювати стан потерпілого до прибуття медичних працівників.

Працівники повинні проходити періодичне навчання та тренування з надання домедичної допомоги.

Реалізація запропонованих заходів дозволяє забезпечити безпечну експлуатацію інверторного обладнання, знизити ризик аварійних ситуацій та створити належні умови праці для персонала [6,7].

5.ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОЕКТУ

5.1 Планування та визначення трудомісткості розробки

Для оцінки економічних показників розробки інвертора необхідно визначити трудомісткість виконання окремих етапів роботи. До основних етапів створення пристрою належать аналіз науково-технічної літератури, розробка структурної схеми, математичні розрахунки, комп'ютерне моделювання, аналіз результатів досліджень та оформлення пояснювальної записки.

Трудомісткість виконання робіт наведена в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Трудомісткість виконання робіт

Етап роботи	Тривалість, год
Аналіз літературних джерел	40
Розробка структурної схеми інвертора	35
Розрахунок параметрів силової частини	45
Розробка моделі Н-моста	35
Розробка моделі LCL-фільтра	30
Моделювання інвертора в Cadence Virtuoso	55
Аналіз результатів моделювання	30
Підготовка пояснювальної записки	50
Разом	320

На основі проведеного аналізу загальна трудомісткість виконання дипломної роботи становить 320 людино-годин.

5.2 Розрахунок фонду оплати праці

Для виконання робіт залучається інженер-розробник.

Годинна тарифна ставка визначається за формулою:

$С_г = М / Ф_м$

де:

М – середньомісячна заробітна плата інженера;

$Ф_м$ – місячний фонд робочого часу.

Приймаємо:

М = 25000 грн;

$Ф_м$ = 168 год.

Тоді:

$С_г = 25000 / 168 = 148,81$ грн/год.

Основна заробітна плата:

$З_{осн} = С_г \times Т$

$З_{осн} = 148,81 \times 320$

$З_{осн} = 47619$ грн.

Додаткова заробітна плата приймається на рівні 15 %:

$_{здод} = 0,15 \times 47619$

$З_{дод} = 7143$ грн.

Фонд оплати праці:

$З_ф = 47619 + 7143$

$З_ф = 54762$ грн.

Єдиний соціальний внесок:

$Є_{СВ} = 0,22 \times 54762$

$Є_{СВ} = 12048$ грн.

5.3 Розрахунок витрат на електроенергію

Під час виконання дипломної роботи використовувалися персональний комп'ютер та допоміжне обладнання.

Витрати електроенергії визначаються за формулою:

$B_e = P \times t \times C$

де:

P – середня потужність обладнання;

t – тривалість роботи;

C – тариф на електроенергію.

Приймаємо:

P = 0,3 кВт;

t = 320 год;

C = 4,32 грн/кВт·год.

Тоді:

$B_e = 0,3 \times 320 \times 4,32$

$B_e = 414,72$ грн.

Отже, витрати на електроенергію становлять 415 грн.

5.4 Розрахунок амортизаційних відрахувань

Для виконання проекту використовувався персональний комп'ютер вартістю:

$B_{пк} = 40000$ грн.

Нормативний термін служби:

$T_{сл} = 5$ років.

Річна амортизація:

$A_р = 40000 / 5$

$A_р = 8000$ грн.

За два місяці роботи:

$А_м = (8000 \times 2) / 12$

$А_м = 1333$ грн.

5.5 Розрахунок накладних витрат

До накладних витрат належать:

– адміністративні витрати;

– витрати на інтернет та зв'язок;

– витрати на програмне забезпечення;

– господарські витрати.

У розрахунках приймаємо накладні витрати на рівні 80 % від основної заробітної плати:

$В_{накл} = 0,8 \times 47619$

$В_{накл} = 38095$ грн.

5.6 Калькуляція собівартості розробки

Зведений розрахунок витрат наведено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Калькуляція собівартості розробки

Стаття витрат	Сума, грн
Основна заробітна плата	47619
Додаткова заробітна плата	7143
ЄСВ	12048
Комплектуючі	3410
Електроенергія	415
Амортизація обладнання	1333
Накладні витрати	38095
Разом	110063

Повна собівартість виконання дипломного проекту становить:

С = 110063 грн

5.7 Визначення ціни розробки

Для визначення договірної ціни врахуємо нормативний прибуток у розмірі 20 %.

П = 0,2 × С

П = 0,2 × 110063

П = 22013 грн.

Договірна ціна розробки:

Ц = С + П

Ц = 110063 + 22013

Ц = 132076 грн.

5.8 Розрахунок економічного ефекту

Розроблений інвертор має ККД понад 94 %, що дозволяє зменшити втрати електроенергії у фотоелектричній системі.

Припустимо, що порівняно зі стандартним інвертором втрати електроенергії зменшуються на 700 кВт·год за рік.

За тарифом:

$Ц_{ел}$ = 4,32 грн/кВт·год.

Річна економія:

$Е_р$ = 700 × 4,32

$Е_р$ = 3024 грн.

Крім економії електроенергії додатковий ефект забезпечується завдяки:

– підвищенню якості електроенергії;

– зменшенню нагріву обладнання;

– підвищенню ресурсу силових елементів;

– покращенню роботи автономної сонячної електростанції.

5.9 Розрахунок рентабельності

Рентабельність розробки визначається за формулою:

$R = (П / С) \times 100\ \%$

$R = (22013 / 110063) \times 100$

$R = 20\ \%$

Отже, рентабельність проекту становить 20 %, що відповідає нормативним показникам для науково-технічних розробок.

5.10 Визначення терміну окупності

Термін окупності визначається як відношення вартості розробки до річного економічного ефекту:

$Т_{ок} = С / Ер$

$Т_{ок} = 110063 / 3024$

$Т_{ок} = 36{,}4$ року.

Слід зазначити, що для одиничного дослідного зразка термін окупності є значним. Однак у випадку серійного виробництва собівартість інвертора може бути знижена на 40–60 %, що суттєво покращить економічні показники та скоротить термін окупності до прийнятного рівня.

У результаті виконаних розрахунків було визначено економічні показники розробки інвертора для фотоелектричної системи. Загальна трудомісткість робіт склала 320 людино-годин. Повна собівартість розробки становить 110063 грн, а договірна ціна з урахуванням нормативного прибутку – 132076 грн.

Проведений аналіз показав, що найбільшу частку витрат становлять витрати на оплату праці та накладні витрати, тоді як вартість електронних компонентів є відносно невеликою. Розроблений інвертор забезпечує

високий коефіцієнт корисної дії та може бути використаний у складі автономних фотоелектричних систем.

Отримані результати свідчать про технічну та економічну доцільність подальшого вдосконалення розробки та можливість її впровадження у серійне виробництво.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі було проведено дослідження сучасних фотоелектричних систем та інверторних перетворювачів, що використовуються в автономних сонячних електростанціях. Виконано аналіз принципів перетворення сонячної енергії в електричну, розглянуто особливості роботи фотоелектричних модулів, вплив освітленості та температури на їх характеристики, а також методи підвищення ефективності роботи сонячних енергетичних установок.

У процесі виконання роботи досліджено алгоритми відстеження точки максимальної потужності (MPPT) та обґрунтовано доцільність використання алгоритму Three Point Weight Comparison (TWC). Встановлено, що застосування даного алгоритму забезпечує більш точне визначення точки максимальної потужності, зменшує коливання робочих параметрів та підвищує ефективність використання енергії сонячного випромінювання в умовах змінної інсоляції.

Проведено огляд та порівняльний аналіз існуючих топологій інверторів, зокрема двокаскадних та однокаскадних рішень. Визначено їх основні переваги та недоліки з точки зору енергоефективності, складності реалізації, вартості та експлуатаційних характеристик. Аналіз показав, що сучасні інверторні системи забезпечують високий коефіцієнт корисної дії та дозволяють формувати вихідну напругу з низьким рівнем гармонічних спотворень, що є важливою умовою для якісного електроживлення споживачів.

У рамках роботи було розроблено та досліджено схему автономного інвертора для сонячної електростанції. Створено модель системи, що включає фотоелектричний модуль, MPPT-контролер, силовий інвертор та вихідний фільтр. Проведене моделювання підтвердило працездатність

обраної структури та показало можливість формування стабільної вихідної напруги 220 В частотою 50 Гц при змінних параметрах джерела живлення.

Отримані результати свідчать, що використання алгоритму TWC у поєднанні з сучасною інверторною топологією дозволяє підвищити ефективність перетворення енергії, покращити якість вихідної напруги та забезпечити надійну роботу автономної фотоелектричної системи. Розроблене рішення може бути використане під час створення автономних та резервних систем електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії.

Перспективою подальших досліджень є вдосконалення алгоритмів MPPT-керування, застосування інтелектуальних методів оптимізації, а також підвищення енергоефективності інверторних систем шляхом використання сучасних напівпровідникових приладів і цифрових систем керування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1.Renewables 2013. Global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Centure. Електронний ресурс http://www.ren21.net (дата звернення:31.09.2025).

2.Велігорський О.А. Фотоелектричні перетворювачі із системою слідкування за точкою максимуму потужності Вісник Сумського державного університету: зб. – Суми: СумДУ, 2011. - С. 112-121. https://essuir.sumdu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/0cb77f4d-a6dc-4014-9586-a4144923f27c/content (дата звернення:11.10.2025).

3.Мороз В., Чупило Я. Порівняння методів пошуку точки максимальної потужності для сонячних батарей // Вісник Національного університету «Харківська політехніка». – 2011. – № 707 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 87-90 https://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/eie_2016_no.41_vol.1.pdf (дата звернення:01.02.2026).

4. Wajid Mudassir M.A. та ін. Comparative Study of SPWM & SVPWM Based Three Phase Voltage Source Inverter for a UPS System Operating Under Non Linear Loads. IJAREEIE, 2015. http://dx.doi.org/10.15662/ijareeie.2015.0405046 (дата звернення:21.03.2026).

5. Vairavasundaram, I., Varadarajan, V., Pavankumar, P.J., Kanagavel, R.K., Ravi, L., & Vairavasundaram, S. (2021). A Review on Small Power Rating PV Inverter Topologies and Smart PV Inverters. Electronics, 10(11), 1296. https://doi.org/10.3390/electronics10111296 (дата звернення:23.04.2026).

6. Л. В. Дементій, А. Л. Юсіна. Охорона праці в автоматизованому виробництві. Забезпечення безпеки праці. URL: http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/hiop/metod/20_otofam.pdf (дата звернення: 01.05.2026).

7. Шуаібов О.К. ПРАКТИКУМ З ОХОРОНИ ПРАЦІ. URL: http://moodle.nati.org.ua/mod/resource/view.php?id=9730 (дата звернення:31.05.2026).

Формат	Зона	Поз	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
		1	ДП.22009.00.00.00	Корпус	1	Сталь
		2	ДП.22009.00.00.01	Кришка корпусу	1	
		3	ДП.22009.00.00.02	Плата керування	1	У зборі
		4	ДП.22009.00.00.03	Радіатор охолодження	2	Алюміній
		5	ДП.22009.00.00.04	Трансформатор Т1	1	12/220В
		6	ДП.22009.00.00.05	Вентилятор	2	12В
		7	ДП.22009.00.00.06	Панель індикаторів	1	
		8	ДП.22009.00.00.07	Клемна колодка	2	
		9	ДП.22009.00.00.08	Запобіжник	1	
		10	ДП.22009.00.00.09	Вимикач живлення	1	
		11	ГОСТ 7798-70	Гвинт М3/10	12	
		12	ГОСТ 6402-70	Шайба 3	12	
		13	ГОСТ 5915-70	Гайка М3	12	

Перв. застосув.

Довід. №

Підп. і дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

Підп. і дата

Інв. № подл.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.		Котцхов		8.06.26
Перевір.		Шмалій		8.06.26
Н.контр.		Туришев		8.06.26
Затверд.		Критська		8.06.26

ЕІСПЗ ДП.22009.00.00.00.00

Інвертор для автономної сонячної станції
Збірне креслення

Літ.	Аркуш	Аркушів
	1	1

ІННІ ім Ю.М. Потебні ЗНУ
6.1712

Копіював

Формат А4

Формат	Зона	Поз	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				Документація		
A1			ЕІСПЗ ДП.22009.00.00.00.00.Е1	Інвертор для автономної сонячної станції. Схема електрична структурна		
A1			ЕІСПЗ ДП.22009.00.00.00.00.Д1	Інвертор для автономної сонячної станції. Електрична схема		
A1			ЕІСПЗ ДП.22009.00.00.00.00.Д3	Інвертор для автономної сонячної станції. Функціональна схема		
A1			ЕІСПЗ ДП.22009.00.00.00.00.	Інвертор для автономної сонячної станції. Збірне креслення		
A1			ЕІСПЗ ДП.22009.00.00.00.00.Д2	Інвертор для автономної сонячної станції. Охорона праці		
A1			ЕІСПЗ ДП.22009.00.00.00.00.Д3	Інвертор для автономної сонячної станції. Економічні показники		

Перев. застосув.

Довід. №

Підп. і дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

Підп. і дата

Інв. № подл.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.		Котухов		8.06.26
Перевір.		Шмалій		8.06.26
Н.контр.		Туришев		8.06.26
Затверд.		Критська		8.06.26

ЕІСПЗ ДП.22009.00.00.00.00

Інвертор для автономної сонячної станції

Літ.	Аркуш	Аркушів
	1	1

ІННІ ім Ю.М. Потебні ЗНУ
6.1712

Копіював

Формат А4