

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис) Юлія ЯМНЕНКО  
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)  
“ ” \_\_\_\_\_ 2020р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальністю 171 Електроніка  
(код і назва)

освітня програма (спеціалізація) Електронні компоненти і системи

на тему: Перетворювач для фотобатарей

Виконав (-ла): студент (-ка) II курсу, групи ДС-91мпв  
(шифр групи)

Ігнатушенко Олег Ярославович  
(прізвище, ім'я, по батькові) \_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник Проф., д.т.н., Валерій ЖУЙКОВ  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ) \_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(назва розділу) \_\_\_\_\_ (науковий ступінь, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ) \_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, ім'я ПРІЗВИЩЕ) \_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант  
по нормоконтролю \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, ім'я ПРІЗВИЩЕ) \_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет Електроніки  
( повна назва )

Кафедра Електронних пристроїв та систем  
( повна назва )

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо - професійною програмою

Спеціальність 171 Електроніка  
(шифр і назва)

Освітня програма (спеціалізація) Електронні компоненти і системи

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)                      Юлія ЯМНЕНКО  
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 року

**З А В Д А Н Н Я**

**НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

Ігнатушенко Олег Ярославович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Перетворювач для фотобатарей  
науковий керівник дисертації Валерій ЖУЙКОВ, д.т.н., проф.

(ім'я ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 1 » грудня 2020 року № 3423-с

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження Перетворювач для фотобатарей

4. Вихідні дані побудова пристрою розрахованого для роботи з фотобатареею напругою 30 В, потужністю 60 Вт та підключення акумулятору напругою 12...27 В.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити огляд технологій, що використовуються у перетворювачів для фотобатарей, розробка структурної схеми, вибір та розрахунок елементів схеми, розробка програмного забезпечення, побудова на дослідження схеми

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу структурна схема,  
схема електрична принципова, креслення друкованої плати, слайди презентації

## 7. Орієнтовний перелік публікацій

1. Ігнатушенко О.Я. Використання технологій інтернету речей для розробки МРРТ-контролеру, Осінні наукові читання, ЛІІ Міжнародна науково-практична інтернет-конференція. – м. Дніпро, 25 вересня 2020 року. – Частина 3, 48-50 с.;

2. Ігнатушенко О.Я. Тестування контролера знаходження точки максимальної потужності сонячної батареї // Електронна та Акустична Інженерія, Том №4. – Київ: 2020р. – DOI: 10.20535/2617-0965.2020.3.4.200721

## 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 02.09.19

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
	Огляд літератури	02.09.19-09.09.20	виконано
	Побудова структурної схеми	09.09.20-16.09.20	виконано
	Вибір та розрахунок елементів	16.09.20-07.10.20	виконано
	Розробка програмного забезпечення	07.10.20-21.10.20	виконано
	Побудова друкованої плати	21.10.20-4.11.20	виконано
	Проведення експериментальних досліджень	4.11.20-11.11.20	виконано
	Розробка стартап проекту	11.11.20-18.11.20	виконано
	Оформлення роботи	18.11.20-25.11.20	виконано

Студент

(підпис)

Олег ІГНАТУШЕНКО

(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Валерій ЖУЙКОВ

(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## АНОТАЦІЯ

Метою роботи є вивчення, розробка та побудова перетворювача для фотобатареї, що буде задовольняти попередньо заданим умовам, використовуючи при цьому безпроводні технології, отримати навички з побудови друкованої плати та провести перевірку працездатності.

У роботі були досліджені схеми перетворювачів для фотобатарей, їх алгоритми роботи та існуючі аналоги. Запропоновано використання модуля для безпроводного інтерфейсу користування.

В результаті було побудовано перетворювач для фотобатареї, а також було перевірено його працездатність та можливість безпроводного зв'язку.

Виходячи з отриманих результатів, можна побачити роботу розробленого перетворювача, зокрема вибраної комбінації силової та цифрової частини схеми.

Відповідно до цього можна дійти висновку про можливі способи впровадження використаних технологій для вдосконалення існуючих перетворювачів.

Наступним етапом дослідження побудованого перетворювача є максимальний акцент на підвищення енергоефективності, як через використання одноплатного дизайну так і використовуючи енергозберігаючі режими безпроводного зв'язку.

**Ключові слова:** перетворювач для фотобатареї, слідкування за точкою максимальної потужності, безпроводні технології.

## ANOTATION

The purpose of the study is to review, develop and build converters for photovoltaics that will meet the pre-set conditions, using this wireless technology, and gain skills in building a printed circuit board and test performance in practice.

During the work, scheme of photovoltaics converter, their working algorithms and existing analogues were studied. In addition, wireless interface is proposed to use in development.

As a result, a photovoltaics converter was built, as well as tested its condition operability and wireless communication proposal.

Based on the results, operational functionality of developed converter was presented, in particular the selected combination of power and digital electronics part of the circuit.

Accordingly, as a conclusion it can be possible to implement developed ideas and technologies into existing converters to improve functionality and attractiveness.

The next stage of research of the constructed converter will be maximizing aim on increasing energy efficiency; it is possible by designing a single-board solution as well as by using energy-saving modes of wireless communication modules.

**Keywords:** photovoltaics converter, maximum power point tracking, wireless technology.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД</b> .....	8
1.1. Загальні відомості .....	8
1.2 Схеми DC-DC перетворювачів .....	21
1.3 Методи знаходження ТМП .....	26
1.4 Порівняння сучасних систем .....	30
<b>2. РОЗРОБКА І ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ</b> .....	34
<b>3. РОЗРОБКА І ОБҐРУНТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ</b> .....	37
3.1. Система керування.....	37
3.1.1 Мікроконтролер .....	37
3.1.2 Давач струму .....	40
3.1.3 Давач напруги.....	41
3.1.4 Блок живлення системи керування .....	42
3.2. Силова частина.....	44
3.2.1 Розрахунок перетворювача постійної напруги .....	46
3.2.2 Драйвер для керування силовими транзисторами.....	50
3.3 Інтерфейс користувача .....	53
3.3.1 Дисплей .....	53
3.3.2 Дистанційний моніторинг та інтерфейс керування.....	53
<b>4. РОЗРОБКА І ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕСПЕЧЕННЯ</b> .....	58
4.1. Програмне забезпечення системи керування.....	58
4.2 Програмне забезпечення для дистанційного моніторингу та керування .....	63
<b>5. ПОБУДОВА ТА ТЕСТУВАННЯ ПРИСТРОЮ</b> .....	70
<b>6. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ</b> .....	81
6.1. Опис ідеї проекту .....	83
6.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	83

6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	84
6.4 Розробка ринкової стратегії стартап-проекту .....	87
<b>ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ .....</b>	<b>90</b>
<b>ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>92</b>
<b>ДОДАТОК 1. Лістинг програмного забезпечення</b>	
<b>ДОДАТОК 2. Схема електрична принципова</b>	
<b>ДОДАТОК 3. Креслення друкованої плати</b>	

## ВСТУП

**Актуальність.** Останнім часом збільшується попит на відновлювальні джерела енергії, зокрема сонячну. Це відбувається через зменшення попиту на інші види палива через погану репутацію, відходи атомної енергетики та обмеженість таких викопних ресурсів як, наприклад, вугілля. Ріст популярності сонячної енергетики, зокрема сонячних батарей, значно зменшує вартість та підвищує доступність сонячної енергетики. Ще одною перевагою сонячної батареї є відсутність необхідності у використанні води, а також можливість використання невеликих установок, які можуть використовуватись для живлення невеликих пристроїв чи віддалених від централізованого електропостачання будівель.

Сонячні батареї можуть одразу використовуватися як джерело постійної напруги, однак ця напруга є нестабільною, та дуже сильно залежить від погодних умов. Тому для підключення сонячної батареї завжди використовується проміжний перетворювач, який можна вибирати в залежності від потреб споживача, та використовувати для отримання як постійної напруги для заряду акумулятори так і змінної напруги мережі для побутових пристроїв.

Важливим питанням являється збільшення ефективності сонячної енергетики. Одним з важливих компонентів відновлювальних джерел енергії є використання перетворювачів постійної напруги, зумовлене особливістю сонячних батарей, що використовуються як джерело сонячної енергії. Через нелінійну криву навантаження та залежність від рівня освітленості та температури потужність сонячних батарей може змінюватись, що унеможлиблює використання статичних значень струму та напруги споживання. При використанні сонячної батареї важливим є постійне коригування споживання для того, щоб мати змогу використовувати максимальну можливу потужність, що значно збільшує вихідну ефективність батареї. Для знаходження максимальної потужності застосовуються різні



алгоритми, які використовують окремі параметри сонячної батареї, зокрема миттєві значення струму та напруги на виході батареї, її температуру тощо.

Окрім цього актуальним є використання сучасних безпроводних технологій, які з розвитком електроніки та Інтернету стають все доступнішими, а використання їх у пристроях значно збільшує функціонал і зручність користуванням, що відповідно збільшує інтерес для покупців.

**Мета і завдання дослідження:** розробка перетворювача для фотобатареї, використовуючи багатофункціональні рішення силових частин для можливого використання та дослідження різних алгоритмів пошуку максимальної потужності, а також системи керування, за допомогою чого, з'явиться можливість використання сучасних технологій дистанційної передачі даних.

Для досягнення мети розглядалися наступні **задачі:**

- визначення робочих параметрів системи;
- визначення можливих варіантів схем та алгоритмів пошуку точки максимальної потужності;
- проектування та розрахунок системи, використовуючи сумісні з робочими параметрами роботи, елементами;
- проектування та побудова друкованої плати;
- програмування мікроконтролерів;
- проведення перевірки роботи системи.

*Об'єктом дослідження* є перетворювач для фотобатареї.

*Предмет дослідження* – проблеми розробки та побудови перетворювача для фотобатареї та використання безпроводних технологій.

#### **Методи досліджень.**

Теоретичні положення побудовані на базі теорії електричних кіл, інформаційних технологій, теорії передачі інформації та обробки сигналів, мікропроцесорного програмування та документацій до вибраних пристроїв. Досліджені та реалізовані алгоритми пошуку точки максимальної

потужності. Побудовано друковано плату системи та досліджено її працездатність.

**Наукова цінність отриманих результатів** полягає у розробці перетворювача для фотобатареї з використанням безпроводних технологій завдяки використанню сучасних цифрових модулів.

**Практична цінність отриманих результатів.** Запропоновано дизайн системи з використанням модулів дистанційного керування та моніторингу системи через мережу Wi-Fi. Система була успішно розроблена, експериментально перевірена працездатність її роботи для знаходження максимальної потужності сонячної батареї, зокрема керуючих сигналів драйверу, а також продемонстрована робота локальної сторінки у інтернет-браузері, за допомогою було відображено миттєві покази давачів струму та напруги системи.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати досліджень та розробок доповідались на міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Осінні наукові читання».

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 2-ох публікаціях:

1. Ігнатушенко О. Я. Використання технологій інтернету речей для розробки MPPT-контролеру, Осінні наукові читання, ЛІІ Міжнародна науково-практична інтернет-конференція. – м. Дніпро, 25 вересня 2020 року. – Частина 3, 48-50 с.

2. Стаття публікується у грудні 2020 р.: Ігнатушенко О.Я. Тестування контролера знаходження точки максимальної потужності сонячної батареї // Електронна та Акустична Інженерія, Том №4. – Київ: 2020р. – DOI: 10.20535/2617-0965.2020.3.4.200721.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 46 найменувань і 3 додатків. Загальний обсяг роботи складає 96 сторінок, в тому числі 91 сторінок основного тексту, 48 рисунків і 18 таблиць.



# 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

## 1.1. Загальні відомості

Головним ресурсом енергії на землі є сонячне випромінювання. Потужність цього випромінювання досягає значень  $1,7 \cdot 10^{17}$  Вт, з них 34% будуть відбиті від поверхні, 42% перетворено у тепло, 23% буде збережено у водяному парі, вітряні водянні хвилі споживають близько 1%, а рослини – 0,023%. Все це відображає перспективи розвитку сонячної енергетики [1, с.5].

В загальному, сонячна енергія – це випромінювання світла та тепла від Сонця, що збирається використовуючи такі технології як, сонячні колектори, фотоелектрика, геліотермальна енергетика, сонячна архітектура, електростанції з розплавленою сіллю та штучним фотосинтезом та інші технології, які постійно розвиваються та створюються останнім часом.

Люди споживають енергію здебільшого з вугілля, атомної енергетики та нагрівання земної поверхні. Будь-яка форма енергії перетворюється у тепло та в кінцевому рахунку у випромінювання. До сьогодні, не використовувались прямі переходи енергії з сонячного випромінювання до енергії для людського споживання. Це відбувалося зокрема через: відсутність достатньо енергоефективних пристроїв, слабкої густини енергії сонячного випромінювання та непостійності такого випромінювання, що може змінюватись як протягом дня та сезонів року так і від розташування на Землі.

Основним методом добування електричної енергії є фотовольтаїка. Фотовольтаїка — метод генерації електроенергії шляхом перетворення енергії сонячного випромінювання у постійний електричний струм з використанням напівпровідникових матеріалів, які проявлять фотоелектричний ефект. Фотоелектрична система використовує панелі сонячних батарей, які складаються із множини сонячних елементів для отримання корисної сонячної електроенергії. Такі системи перетворюють

сонячне випромінювання напряму в електрику, тобто без використання механічної енергії.

Фотоелектричний ефект вперше був відкритий Едмундом Біквірилом у 1839 році, коли він помітив вплив світла на покритий сріблом та занурений в електроліт платиновий електрод почав виробляти електричний струм. Через 40 років, при дослідженні фотопровідності селену, був побудований перший твердотільний фотоелектричний пристрій. У 1876 році Вільям Адамс та Річард Дей дослідили появу фотоструму у зразку селену, до якого були під'єднані два нагрітих платинових контакти. Ця фотоелектрична властивість селену відрізнялася від фотопровідності, де струм виникав спонтанно під дією світла, зараз же не було потреби у зовнішньому блоці живлення для появи струму. У перших фотоелектричних пристроях випрямляючий перехід між напівпровідниковим та металевим контактом. У 1894 Чарльз Фрітс побудував першу сонячну комірку великої площі, стиснувши селен між золотом та іншим металом. У наступні роки фотоелектричний ефект спостерігався у структурах тонкоплівкових оксидів міді, сульфіді свинцю та сульфіді талію. Ці ранні комірки були тонкими бар'єрними пристроями Шотткі, де напівпрозорий шар металу, нанесений на поверхню напівпровідника, забезпечував як асиметричний електронний перехід, необхідний для фотоелектричного ефекту, так і можливість переходу для падаючого світла. Фотоелектричний ефект для подібних сполук, що був пов'язаний із існуванням бар'єру для потоку струму на одному з метал-напівпровідникових зв'язків, був досліджений Голдманом та Бродським в 1914 році. Пізніше, у 1930-х, теорія метал-напівпровідникових бар'єрних шарів розробили Вальтер Шотткі, Невілл Мотт та інші.

Однак дослідників хвилювали не фотоелектричні властивості таких матеріалів, як селен, а фотопровідність. Той факт, що вироблений струм був пропорційним інтенсивності падаючого світла і певним чином пов'язаний з довжиною хвилі, означав, що фотопровідні матеріали є ідеальними для фотометрів. Фотоелектричний ефект у бар'єрних конструкціях був лише

додатковою перевагою, що означало, що лічильник світла може працювати без джерела живлення. Лише в 1950-х роках, коли були розроблені кремнієві пластини достатньої якості для застосування в новій твердотільній електроніці, що потенційно дозволило використовувати фотоелектричними пристроями на кристалічному кремнії виробляти достатньо енергії.

У 1950-х роках розвиток кремнієвої електроніки супроводжувався відкриттям способу виготовлення р–п переходів у кремнії. Природньо кремнієві пластини п типу нарощують на поверхні плівку р типу під дією газу трихлориду бору.

Частина плівки може бути протравленою, щоб отримати доступ до шару п типу внизу. Ці р-п перехідні структури давали набагато кращу випрямну дію, ніж бар'єри Шоткі, та кращу фотоелектричну дію. Про перші кремнієві сонячні батареї повідомили Чапін, Фуллер та Пірсон у 1954 році та перетворили сонячне світло з ефективністю в 6%, що в шість разів перевищує найкращу попередню спробу. Ця цифра повинна була значно зрости протягом наступних років і десятиліть, але, за оцінкою виробничої собівартості, яка становить близько 200 доларів за Ватт, ці комірки не були серйозно розглянуті для виробництва електроенергії протягом декількох десятиліть. Тим не менш, ранні кремнієві сонячні батареї ввели можливість вироблення електроенергії у віддалених місцях, куди не можна було легко доставити паливо. Очевидним застосуванням були супутники, де необхідна надійність та низька вага зробила вартість комірок неважливою, і протягом 1950-х та 60-х років кремнієві сонячні батареї були широко розроблені для застосування в космосі.

Також у 1954 р. було винайдено р-п перехід сульфід кадмію з ефективністю 6%, а в наступні роки дослідження фотоелектричних приладів з р–п переходом на основі арсеніду галію, фосфіду індію та телуриду кадмію були досліджені через теоретичну можливість їх високої ефективності. Однак кремній залишався і залишається головним фотоелектричним матеріалом,

отримуючи вигоду від прогресу кремнієвих технологій для галузі мікроелектроніки.

У 70-х роках криза енергопостачання, що сколихнула залежний від нафти західний світ, призвела до несподіваного зростання інтересу до альтернативних джерел енергії та фінансування досліджень та розробок у цих сферах. Фотовольтаїка була предметом інтенсивного інтересу в цей період, і було вивчено цілий ряд стратегій виробництва фотоелектричних пристроїв та матеріалів, що зробило їх дешевшими та підвищило ефективність. Зниження вартості включало фотоелектрохімічні з'єднання та альтернативні матеріали, такі як полікристалічний кремній, аморфний кремній, інші «тонкоплівкові» матеріали та органічні провідники. Хоча більшість з них не призвела до широкого комерційного розвитку, це збільшило розуміння науки про фотоелектрику, та популяризується в цей період [6, с.19].

Протягом 90-х років інтерес до фотоелектрики розширювався разом із зростаючим усвідомленням необхідності забезпечити альтернативу викопним джерелам електроенергії. Тенденція зберігається через розповсюджену практику дерегуляції ринків електроенергії, субсидізації зеленої енергії та зростання децентралізації. За цей період економіка фотоелектрики покращилась насамперед за рахунок дешевизни від масштабів виробництва, насамперед в кінці 1990-х років, виробництво зросло зі швидкістю 15-25% на рік, що сприяло зниженню собівартості. Фотовольтаїки вперше стали конкурентоспроможними в місцях, де звичайне електропостачання є найбільш дорогим, наприклад, для віддалених територій для потреб відносно невеликої потужності, таких як навігація, телекомунікації та електрифікація в сільській місцевості, а також для покращення постачання в мережевих навантаженнях при піковому використанні. По мірі падіння цін відкриваються нові ринки.

При цьому площа панелей може становити від декількох квадратних сантиметрів до декількох квадратних метрів. Збільшуючи кількість панелей

можна добитися більшої генерованої потужності сонячною батареєю. Однак продуктивність сонячної батареї залежить не тільки від площі, але також від інтенсивності сонячного світла й кута падіння променів. Отже, продуктивність сонячної батареї залежить від місцевості й географічної широти від погоди й пори року та від часу доби.

Як і будь-який технічний пристрій, сонячна батарея має свої експлуатаційні й технічні характеристики, які відрізняються для різних моделей, різних виробників, але з досить невеликою різницею. При площі сонячної батареї приблизно 0,2м<sup>2</sup> потужність модуля становить приблизно 10Вт. Напруга при максимальному навантаженні – близько 25В. Струм короткого замикання становить близько 500мкА. Вага такого модуля близько 2кг. Приблизний ККД сонячної батареї – від 14 до 18%. Термін служби такої пластини не менше 25 років.

Незважаючи на порівняно низький ККД сонячна батарея є найбільш ефективним джерелом електрики серед альтернативних і автономних джерел енергії. Однак через досить високу вартість сонячної батареї, а головне залежності від погодних умов, їх у більшості випадків позиціонують не як основне, а як додаткове джерело енергії. Це зумовлено двома причинами, досить високою вартістю самих сонячних батарей, і порівняно невеликим виходом енергії з одиниці площі. У ясний сонячний день із одного квадратного метра площі сонячної батареї можна зняти максимум 120Вт потужності. Цього недостатньо навіть для роботи комп'ютера. Тому для отримання більш істотної потужності сонячні панелі поєднують у міні-електростанції.

В багатьох регіонах України стали нормою короткочасні відключення електрики чи погане освітлення вулиць наших міст і сіл. Сонячна енергетика могла б частково вирішити енергетичні проблеми України, особливо по енергопостачанню віддалених неелектрифікованих осель, а в умовах нестабільного електропостачання, відключення електроенергії такі установки забезпечували б безперебійне електропостачання. В сільському господарстві,



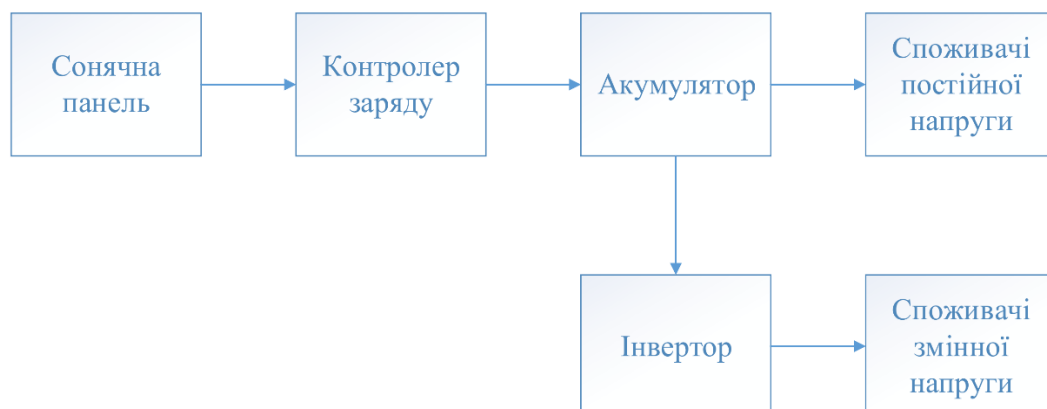
особливо присадибному, тепличних виробництвах, сонячні батареї могли б забезпечувати подачу води за допомогою насосів та полив рослин, а в тваринництві у посушливих районах - подачу води для тварин. Системи сонячних батарей з хімічними акумуляторами є практично єдиними економічно придатними для живлення апаратури в умовах відсутності мережі центрального енергопостачання. Ця проблема не може бути розв'язана традиційним способом будівництва стаціонарної мережі внаслідок її дорожнечі.

Сонячні станції, особливо домашні, практично не вимагають технічного обслуговування. Декілька разів на рік вимагають очищення модулів, в іншому ж станція стабільно служить в середньому 25 років. Також великим плюсом сонячних електростанцій є їх безшумність.

При цьому сонячна енергія не завжди може бути доступною. Найпоширенішим рішенням є використання запасної батареї.

Отже, ми підходимо до проблеми пошуку автономного мобільного джерела електроенергії. Серед різних первинних джерел енергії, які після перетворення дозволяють отримати електроенергію, ми бачимо лише один реальний варіант для реалізації «мобільної електростанції» — систему, що складається з фотогенеруючих панелей, акумуляторних пристроїв та контролера процесу заряджання їх від енергії сонячного випромінювання.

На рис. 1.1, в загальному, представлена структурна схема фотоелектричної системи [6].



Більшість фотоелектричних систем складаються з таких елементів:

- сонячна батарея: основний елемент за допомогою якого відбувається перетворення сонячного випромінювання у електричну енергію;
- акумулятор: необхідний для того, щоб вироблена енергія була доступна у період відсутнього або слабкого випромінювання, також акумуляторна батарея може використовуватись для зберігання невикористаної споживачем енергії;
- контролер заряду: використовується для коригування параметрів струму та напруги на виході сонячної батареї відповідно до вимог заряджання акумулятора.

Додатково, в залежності від споживача, можуть використовуватись схеми електропостачання, які необхідні для забезпечення необхідного типу напруги за допомогою інвертора або перетворювача постійної напруги.

Сонячна батарея складається з окремих комірок з'єднаних послідовно чи паралельно, щоб задовольнити необхідні параметри напруги та струму.

Для найбільшої ефективності роботи сонячних панелей матеріали для виготовлення повинні бути узгоджені з характеристиками спектру випромінювання. Спектр випромінювання Сонця відповідає спектру випромінювання абсолютно чорного тіла, що має температуру поверхні близько 6000 К.

Низька концентрація сонячної енергії передбачає покриття фотовольтаїчними елементами значних площ, а отже виготовлення достатньої кількості кремнію для таких елементів.

Для продукування сонячних фотоперетворювачів використовують й інші напівпровідники, проте в масовому виробництві відносно дешевий кремній з його практично невичерпними запасами сировини не має і в найближчій перспективі не матиме конкурентів.

В даний час для виготовлення фотоелектричних сонячних елементів можуть використовуватися такі матеріали: монокристалічний кремній, полікристалічний кремній, аморфний кремній, телурид кадмію, арсенід галію, сульфат кадмію і ін. Процес виготовлення фотоелемента близький до процесів виготовлення інших напівпровідників.

Основним будівельним блоком сонячної фотоелектрики є сонячна комірка. З точки зору електроніки, комірку можна розглядати як два пристрої в залежності від освітлення: в темряві - проводить струм, як діод, а при появі сонця - створює фотонапругу. Зазвичай комірка представляє собою тонкий шматок напівпровідникового матеріалу площею близько 100 см<sup>2</sup>. Поверхня обробляється таким чином, щоб вона відбивала якомога менше видимого світла, через що має темно-синій або чорний колір. На поверхні друкуються металеві вставки для створення електричного контакту (рис. 1.2), перпендикулярно яким розміщені тонкі смужки, що збирають згенерований струм з усієї площі комірки [6, с.20].

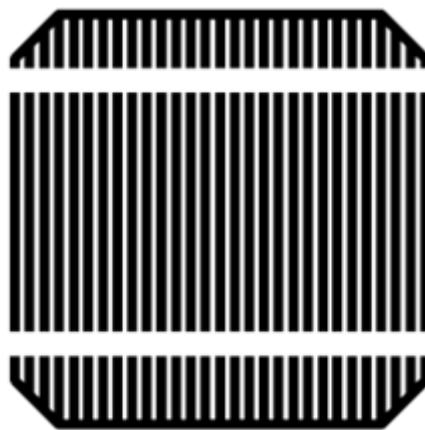


Рис. 1.2

Під дією світла, цей базовий пристрій генерує постійну фотонапругу від 0,5 до 1 вольт і, за короткого замикання, фотострум у десятках міліампер на см<sup>2</sup>. Хоча струм має достатній діапазон значень, напруга є занадто малою для більшості застосувань. Для отримання корисної постійної напруги комірки з'єднуються між собою послідовно і вбудовуються в модулі. Модуль,

як правило, містить 28 - 36 комірок послідовно, щоб генерувати вихідну напругу 12 В у стандартних умовах освітлення (рис.1.3).

Модулі напругою 12 В можуть використовуватися поодинокі, або паралельно і з'єднуватись в масив із більшим виходом струму та напруги відповідно до потужності, яка вимагається завданням (рис. 1.4).

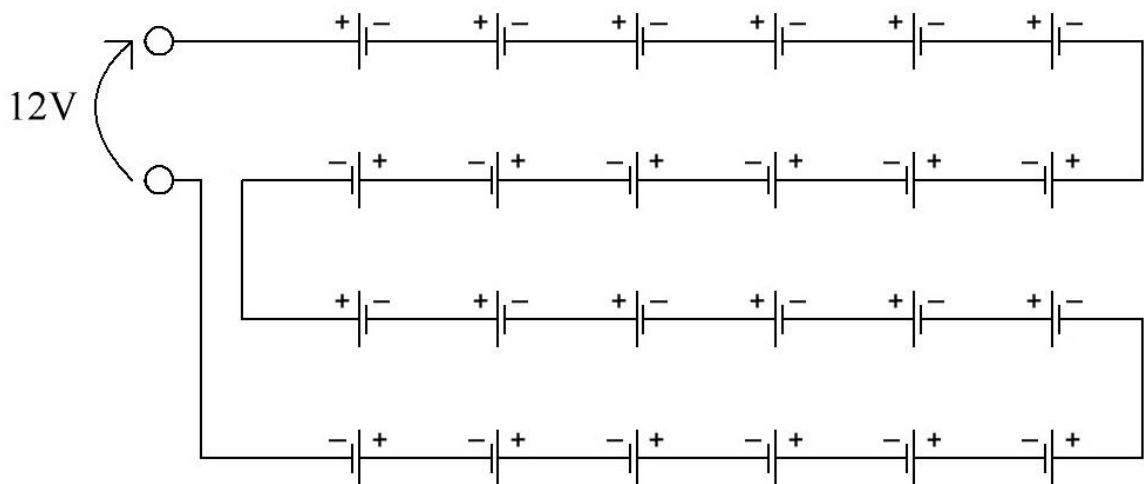


Рис. 1.3

Комірки в модулі інтегруються з обхідними (паралельними до комірки) і блокуючими (послідовними) діодами, щоб уникнути повної втрати потужності, яка може призвести до того, що одна комірка в серії вийде з ладу.

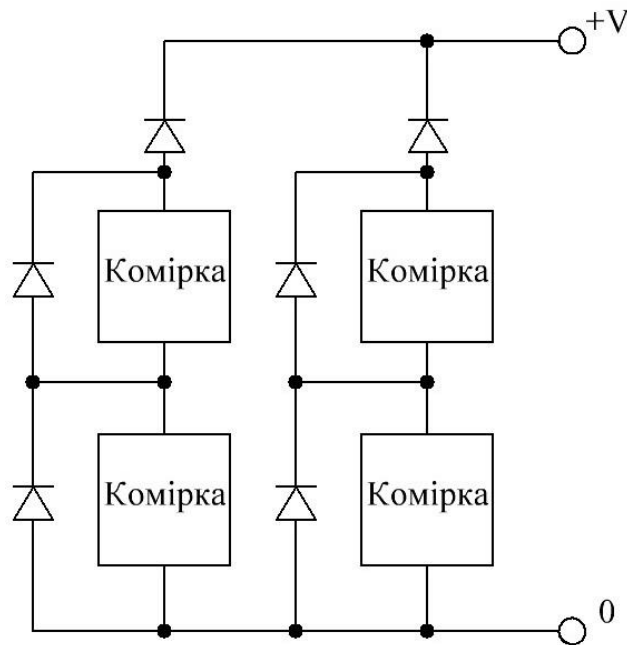


Рис. 1.4

Модулі всередині сонячних панелей захищені аналогічно. Панелі призначені для генерування живлення при певному струмі та напрузі, яка кратна 12 В, при стандартному освітленні. Практично для всіх застосувань освітлення є надто змінним для ефективного функціонування весь час, і фотоелектричний генератор повинен бути інтегрований із системою зберігання заряду (акумулятором) та з компонентами для регулювання потужності (рис. 1.5). Акумулятор використовується для зберігання заряду, виробленого в сонячні періоди, а регулятор забезпечує неперервне живлення та зменшує залежність до сонячного опромінення.

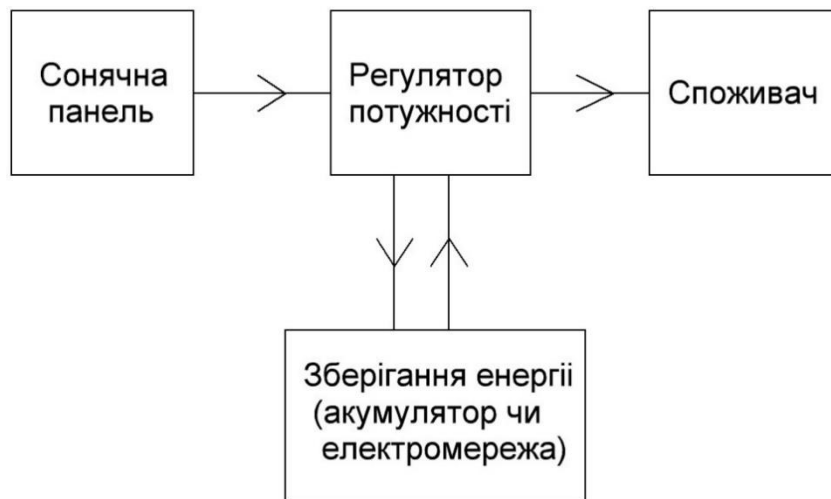


Рис. 1.5

Для живлення приладів змінного струму та для інтеграції в електричну мережу постійний струм, що подається фотоелектричними модулями, перетворюється змінний відповідної частоти за допомогою інвертора. Техніка фотоелектричних систем значною мірою залежить від електричних характеристик окремих комірок.

Фотоелектричний струм ( $I_{\text{кз}}$ ) у комірці, що виробляється під дією освітлення при короткому замиканні залежить від падаючого світла.

При наявному споживачі на виводах комірки утворюється різниця потенціалів. Ця різниця потенціалів генерує струм, який діє у зворотному напрямку до фотоструму, а загальний струм зменшується від його значення короткого замикання. Цей зворотний струм зазвичай називають темновим струмом аналогічно струму  $I_{\text{dark}}(U)$ , який проходить через пристрій під прикладеною напругою  $U$  у темряві. Більшість сонячних комірок поведуть себе як діод у темряві, утворюючи набагато більший струм при прикладанні прямої напруги, ніж при зворотній ( $U < 0$ ). Така поведінка випрямлення є особливістю фотоелектричних пристроїв, оскільки для досягнення поділу заряду потрібен асиметричний перехід. Для ідеального діода темновий струм  $I_{\text{dark}}(U)$  змінюється як

$$I_{\text{dark}}(U) = I_0 \left( e^{qU/k_B T} - 1 \right),$$

де  $I_0$  – константа, що представляє зворотній струм насичення діода;  $k_B$  – константа Больцмана;  $T$  – температура;  $q$  – елементарний електричний заряд.

Загальною характеристика струму та напруги комірки є її ВАХ, що може бути приблизно виражений як сума фотоструму короткого замикання та струму темряви (рис. 1.6). Цей крок відомий як наближення суперпозиції. Наближеність полягає у тому, що зворотний струм, який протікає через напругу в освітленій комірці, не точно рівний темновому, однак таке наближення використовується для багатьох елементів фотоелектрики [6].



Рис. 1.6

Знаки струму і напруги у фотоелектриці визначають такими, щоб фотострум був позитивним. Це протилежне звичній умові для електронних пристроїв. Отже за цієї умови щільність струму в комірці становить:

$$I(U) = I_{KZ} - I_{dark}(U), \quad (1.1)$$

що для ідеального випадку відповідає:

$$I(U) = I_{KZ} - I_0 \left( e^{qU/k_B T} - 1 \right). \quad (1.2)$$

Коли контакти ізолювані, різниця потенціалів знаходиться на максимальному значенні та називається напругою холостого ходу  $U_{XX}$ . Це еквівалентно умові, коли сума темнового струму і фотоструму короткого замикання дорівнює нулю. Для ідеального діода з рівняння 1.2,

$$U_{xx} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{K3}}{I_0} + 1 \right). \quad (1.3)$$

Рівняння 1.3 показує, що  $U_{xx}$  збільшується логарифмічно з інтенсивністю світла. Важливим також є те, що напруга визначається таким чином, що фотонапруга має додатні значення.

На рис. 1.6 видно, що добуток струму та напруги є позитивним, і комірка генерує потужність, коли напруга становить від 0 до напруги холостого ходу. При  $U < 0$  освітлений пристрій виконує функцію фотоприймача, споживаючи енергію, щоб генерувати фотострум, який залежить від світла, але не залежить від зміщення. При  $U > U_{xx}$  пристрій знову споживає енергію. Це режим, коли діють світлодіоди.

Електрично сонячна комірка еквівалентна генератору струму паралельно асиметричному, нелінійному резистивному елементу, тобто діоду (рис. 1.7). При освітленні ідеальна комірка виробляє фотострум, пропорційний інтенсивності світла. Цей фотострум ділиться між змінним опором діода і навантаженням у співвідношенні, яке залежить від опору навантаження та рівня освітленості. Для більш високих опорів більша частина фотоструму протікає через діод, що призводить до більшої різниці потенціалів між клемми комірки, але меншим струмом при навантаженні. Таким чином, діод забезпечує фотонапругу.

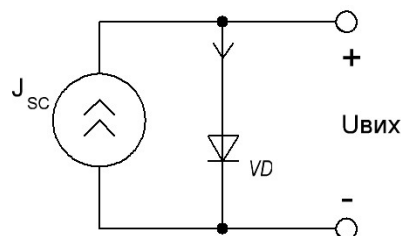


Рис. 1.7

Режимом роботи сонячної комірки є діапазон напруги  $0 \dots U_{xx}$ , під час якого вона виробляє потужність. При цьому на цій ділянці спостерігається точка максимальної потужності (ТМП), яка зображена на рис. 1.8.



Максимальна потужність, а отже і максимальна ефективність комірки визначається наругою  $U_m$  та струмом  $I_m$ , добуток яких буде максимальний у ТМП [3-8, 10].

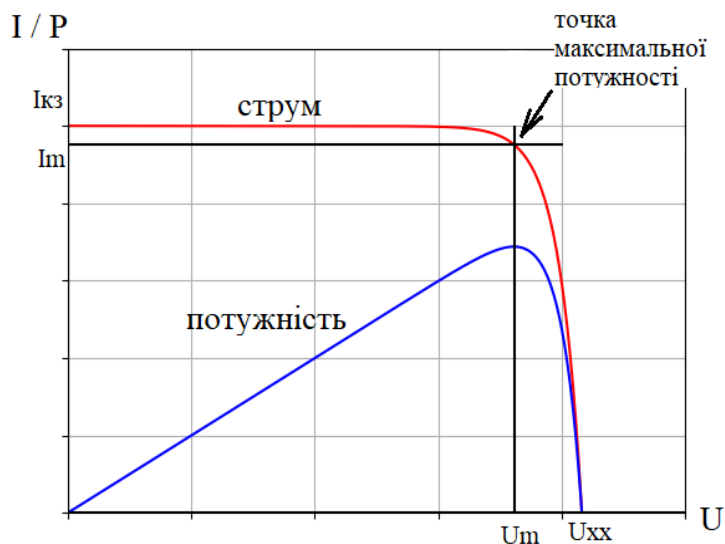


Рис. 1.8

У реальних сонячних комірках відбувається розсіювання енергії через опір контактів та струмів витоку по краях пристрою. Для врахування цих ефектів, в електроніці їх еквівалентно замінюють на два паразитні опори: паралельний ( $R_s$ ) та послідовний ( $R_{sh}$ ), зображені на рис. 1.9 [2, с.33, 9, 15].

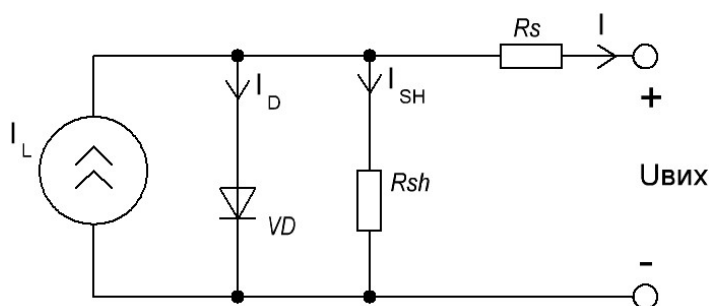


Рис. 1.9

Паралельний опір представляє опори матеріалу комірки, поверхні контактів, а також самих контактів. Паралельний опір представляє проблему під час збільшення струму, як, наприклад, через концентроване освітлення.

Послідовний опір, або шунт, з'являється через струми витоку на краях комірки та між контактами різної полярності.

Приведені опори підставляються у рівняння 1.2 таким чином:

$$I(U) = I_{K3} - I_0 \left( e^{q(U + I(U) \cdot R_s) / k_B T} - 1 \right) - \frac{U + I(U) \cdot R_s}{R_{sh}}. \quad (1.4)$$

Також часто враховується неідеальність поведінки еквівалентного діоду комірки. Додаймо коефіцієнт ідеальності ( $n$ ) до рівняння 1.3 та отримаємо:

$$I(U) = I_{K3} - I_0 \left( e^{q(U + I(U) \cdot R_s) / nk_B T} - 1 \right) - \frac{U + I(U) \cdot R_s}{R_{sh}}. \quad (1.5)$$

## 1.2 Схеми DC-DC перетворювачів

Як було попередньо розглянуто, пряме підключення сонячної батареї до споживача, а особливо до акумуляторних батарей є недоцільним, а отже необхідно використовувати перетворювач постійної напруги. Такий перетворювач зможе регулювати струм та напругу зарядки акумулятора, а також забезпечувати знаходження значень струму та напруги у точці максимальної потужності.

В залежності від діапазону вхідних та вихідних значень напруги перетворювачі постійної напруги поділяються на такі типи:

- buck (понижуючий);
- boost (підвищуючий);
- buck-Boost (комбінований).

Buck призначений для перетворення більшої напруги у низьку стабілізовану напругу. Схема складається з одного перемикача (S1), котушки індуктивності (L1), діоду (VD1) та конденсатора (C1), які зображені на рис. 1.10 [16].

Під час відкритого стану ключа струм проходить через котушку одразу до виходу, після закривання ключа котушка починає розряджатися по колу

L1-C1-VD1, при цьому струм, як і напруга на виході, поступово зменшується. За допомогою описаного процесу середня напруга на виході буде меншою за напругу на вході, а конденсатор на виході згладжує напругу для уникнення пульсацій.

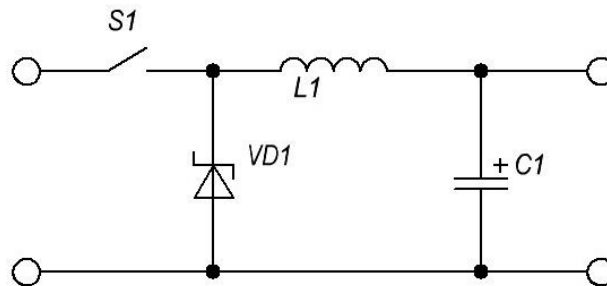


Рис. 1.10

Керуючи відкриванням ключа можна задавати ступінь пониження, для цього зазвичай використовують мікроконтролер, який формує високочастотну широтно-імпульсну напругу, змінюючи коефіцієнт заповнення якої, можна відповідно керувати величиною пониження.

Формула відношення напруг понижуючого перетворювача має такий вигляд в залежності від керуючого сигналу:

$$\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = D, \quad (1.6)$$

де  $U_{вих}$  – вихідна напруга перетворювача;  $U_{вх}$  – вхідна напруга перетворювача;  $D$  – коефіцієнт заповнення для керуючого сигналу ключа.

Boost призначений для перетворення меншої напруги у більшу стабілізовану напругу. Така схема складається з таких самих елементів розташованих як показано на рис. 1.11 [17].

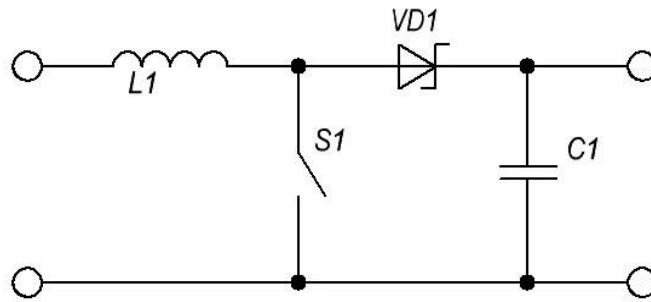


Рис. 1.11

Формула відношення напруг підвищуючого перетворювача, в залежності від керуючого сигналу, має такий вигляд:

$$\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{1}{1 - D}. \quad (1.7)$$

При відпиранні ключа струм у дроселі L1 збільшується і відбувається накопичення енергії, після запирання ключа відкривається діод і конденсатор заряджається від послідовно з'єднаних джерела живлення на вході та дроселя, при цьому ЕРС самоіндукції додається до вхідної, через що напруга на виході схеми буде більшою на напругу на вході.

Buck-Boost призначений для перетворення більшої та меншої напруги у стабілізовану напругу. Розрізняють різні топології Buck-Boost перетворювачів, серед яких:

1) Інвертуючий Buck-Boost (Рис. 1.12) [18]. Така схема утворена шляхом каскадного з'єднання підвищуючого та понижуючого перетворювача. Вихідна напруга цього перетворювача керується за допомогою коефіцієнта заповнення ШИМ.

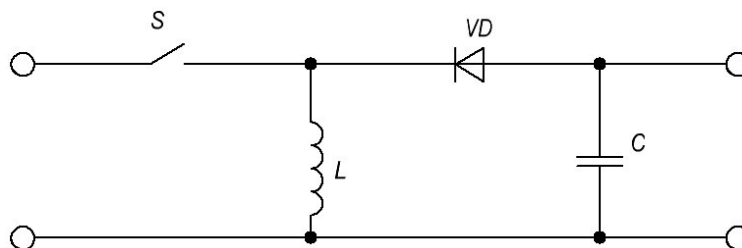


Рис. 1.12

Формула відношення напруг інвертуючого Buck-Boost перетворювача має наступний вигляд:

$$\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = -\frac{D}{1-D}. \quad (1.8)$$

Перевагами такої схеми можна назвати: простоту, ефективність, можливість вимірювання напруги холостого ходу, невелика кількість компонентів. Недоліки: вихідна напруга має інверсне значення, .

2) SEPIC (Рис. 1.13) [19]. Схема утворена шляхом каскадного з'єднання підвищуючого та Buck-Boost перетворювачів, але при цьому не маючи інвертованого виходу. Також важливою різницею перед попередньо розглянутими схемами є збільшення кількості реактивних елементів, в загальному схема складається з таких елементів: 3 конденсатори C1-C3, 2 котушки L1-L2, діоду VD та керованого ключа S.

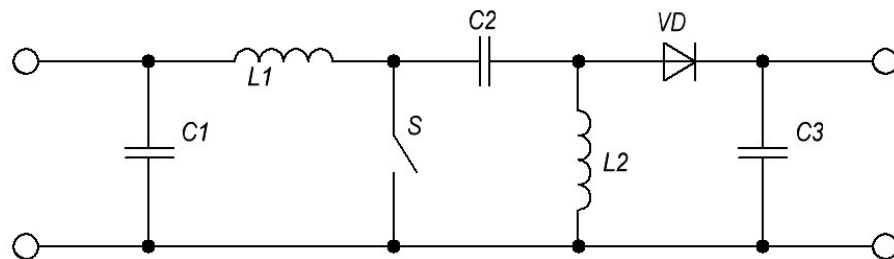


Рис. 1.13

Для регулювання SEPIC перетворювача є наступне відношення напруг, яке представляє формулу для інвертуючого Buck-Boost перетворювача (1.8) без від'ємного знаку:

$$\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{D}{1-D}. \quad (1.9)$$

Перевагами такої схеми можна назвати: неінвертуючий вихід, простота керування. Недоліки: складність схеми, кількість реактивних компонентів, високі робочі значення струму та напруги на C2, через послідовне розміщення.

3) Zeta (рис. 1.14) перетворювач, схожий за кількістю елементів та формули залежності вихідної напруги від вхідної [20]. При цьому відзначається зменшення вихідних пульсацій, та менше використання послідовного конденсатору C2.

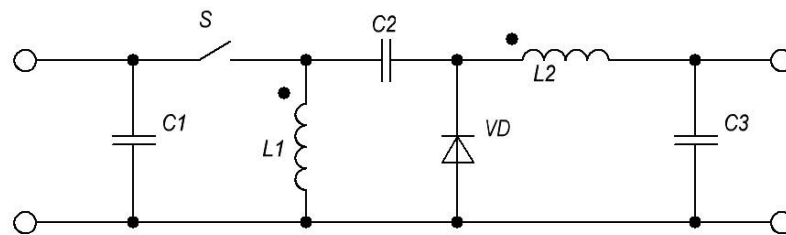


Рис. 1.14

Формула відношення вихідної напруги до вхідної співпадає з рівнянням для SEPIC перетворювача (1.9).

Переваги: неінвертуючий вихід, простота керування, можливість вимірювання напруги холостого ходу. Недоліки: використання двох магнітно-зв'язаних котушок, складність побудови драйвера через відсутність підключення до землі.

4) 2-Switch Buck-Boost (Рис. 1.15). Схема також представляє каскадне підключення понижуючого та підвищуючого перетворювачів, але відрізняється від інших приведених Buck-Boost схем наявністю двох ключів

S1-S2 та двох діодів VD1-VD2, при цьому відсутні послідовний конденсатор та друга котушка. Через наявність двох керованих ключів покращується керованість схеми, хоча і ускладнюється система керування, а один з ключів не під'єднаний до землі, що ускладнює побудову драйверу.

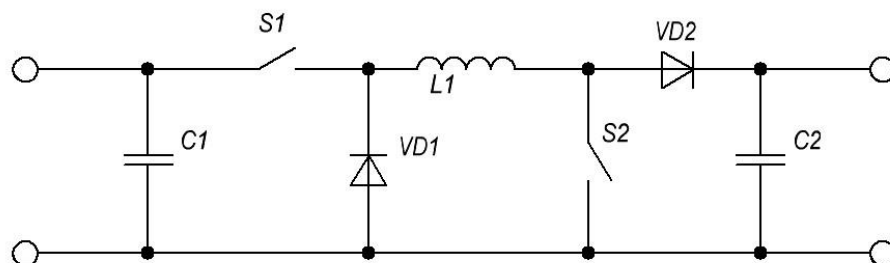


Рис. 1.15

Наведена схема має декілька режимів роботи:

- понижуючий;
- підвищуючий;
- комбінований.

Для роботи у понижуючому режимі ключ S2 розмикається, щоб через нього не проходив струм, при цьому керування величини пониження вихідної напруги відносно вхідної відбувається через ключ S1. Схема при цьому представляє собою звичайний понижуючий (Buck) перетворювач з додатковим діодом VD2. Формула відношення напруг у даному режимі співпадає з формулою для понижуючого перетворювача (1.6).

Для роботи у підвищуючому режимі ключ S1 замикається, та залишається таким, а струм через діод VD1 відсутній. Враховуючи це, схема представляє собою підвищуючий (Boost) перетворювач, керування величиною пониження якого відбувається через ключ S2. Формула відношення напруг співпадає відповідно з формулою для підвищуючого перетворювача (1.7).

Особливим режимом схеми є комбінований режим, у якому керування відбувається одночасно для двох ключів.

Формула відношення напруг співпадає відповідно з формулами для SEPIC та Zeta перетворювачів (1.9).

Головними перевагами даної схеми перетворювача є: неінвертуючий вихід, декілька режимів керування, можливість вимірювання напруги холостого ходу. Недоліки: складність керування, використання чотирьох ключових елементів, відносно великий струм на котушці, складність драйвера.

### 1.3 Методи знаходження ТМП

Для знаходження точки максимальної потужності віддачі від сонячної батареї використовуються різні методи, зокрема виділяють [11, 14]:

1) **Метод постійної напруги (Constant Voltage)**. Робоча точка сонячного модуля утримується поблизу ТМП за рахунок підтримки напруги сонячної батареї на постійному, визначеному документацією, рівні. Цей метод є непрактичним і розрахований тільки на певне визначене значення освітленості, при цьому отримане значення напруги можна використовувати для розрахунку типових значень потужності роботи схеми. Тобто при цьому вважається вплив таких факторів як освітленість і температура не суттєвими, а отриманої постійної напруги достатньо для досягнення оптимальних характеристик сонячного модуля поблизу ТМП. Постійна напруга потребує точного визначення для окремих умов, де буде використовуватись.

2) **Метод збурення і спостереження (Perturb and observe)**. Напруга поступово збільшується чи зменшується допоки не почне падати потужність, при цьому порівнюється значення потужності на попередньому та поточному кроці. Тобто якщо на поточному кроці потужність більша за потужність на попередньому то система продовжує зміщення напруги у заданому напрямі, але якщо значення поточної – менше, то відповідно система керування повинна змінити напрямок зміни напруги. Цей ітераційний метод доволі точно визначає точку максимальної потужності, але при цьому пошук



вимагає певного часу, врахування похибок та флуктуацій, які виникають у околі ТМП. Особливо коливання, біля ТМП, впливають на ефективність під час постійних або при достатньо повільних змінах умов, що визначають ТМП. Також метод може хибно інтерпретувати різкі зміни погодних умов, що додасть додаткові втрати на пошук ТМП.

Крім описаного класичного методу збурення і спостереження, також існують окремі модифікації методу, такі як:

- оптимізований метод збурення і спостереження, де крок зміни робочої точки динамічно змінюється;
- метод порівняння трьох точок, де вимірюється значення за три ітерації, за допомогою чого можна зменшити флуктуації у ТМП.

3) **Метод диференційного опору** (incremental conductance). Контролер вимірює наростання струму та напруги та порівнює ці значення з миттєвими. Метод схожий до Perturb and observe. У основі алгоритму методу лежить рівняння, при виконанні якого робоча точка системи буде знаходитися у ТМП. Це рівняння має наступний вигляд:

$$\left( \frac{dI_{CB}}{dU_{CB}} \right) + \left( \frac{I_{CB}}{U_{CB}} \right) = 0, \quad (1.10)$$

де  $I_{CB}$  – струм сонячної батареї;  $U_{CB}$  – напруга сонячної батареї;  $dI_{CB}$  та  $dU_{CB}$  – зміни відповідних параметрів сонячної батареї.

Спочатку система вимірює струм та напругу на сонячній батареї, після цього, на наступній ітерації вимірюється значення різниці струму на попередньому кроці та поточному, така ж операція відбувається і з напругою. Після отриманих значень змін, а також поточних значень струму та напруги, вони підставляються у рівняння 1.10, при цьому якщо вираз зліва є меншим за нуль, то оптимальна напруга, що лежить на ТМП знаходиться справа на ВАХ, якщо ж вираз більший за нуль, то відповідно шукана ТМП знаходиться зліва. Якщо вираз дорівнює нулю та умова виконується, система визначає, що робоча точка знаходиться у ТМП і підтримує задані величини струму та напруги доки не з'явиться зміна струму на сонячній батареї, при цьому

алгоритм збільшує чи зменшує значення напруги для пошуку нової ТМП, а крок зміни значення напруги буде визначати швидкість знаходження ТМП.

Тобто теоретично за допомогою методу диференційного опору можна визначити коли робоча точка встановиться у ТМП та коли можна зупинити збурення робочої точки. Цей метод показує хороший результат під час постійної зміни атмосферних умов.

4) **Метод холостого ходу** (open circuit voltage). Метод базується на тому, напруга у ТМП ( $U_{\text{ТМП}}$ ) завжди близька до напруги холостого ходу ( $U_{\text{ХХ}}$ ) на один й той же постійній відсотковій величині, при цьому температура може додавати похибку у 2%. Рівняння, що визначає напругу у ТМП визначається наступним чином:

$$U_{\text{ТМП}} = k_{\text{ХХ}} \cdot U_{\text{ХХ}},$$

де  $k_{\text{ХХ}}$  – константа пропорційності. В загальному, в методі холостого ходу для знаходження ТМП використовується 76% ( $k = 0,76$ ) від виміряного значення напруги холостого ходу. Це значення може відрізнятися у різних сонячних батареях та потребує попереднього калібрування. Відносно простий алгоритм пошуку, але вимагає повного відключення сонячної батареї під час вимірювання, що зменшує ефективність, а також може ускладнити схемотехніку, при цьому точність менша ніж у деяких інших методів.

5) **Температурний метод** (Temperature Methods). За допомогою температури можна розрахувати зміну напруги ХХ відносно визначеного за стандартних умов, після чого використовувати метод ХХ, але без втрат часу на постійне вимірювання напруги ХХ. Метод вимагає наявності датчика температури, при цьому відносно метода ХХ похибка збільшується. За допомогою температури можна визначити напругу холостого ходу через наступне рівняння:

$$U_{\text{ХХ}} \cong U_{\text{ХХ}0} + \frac{dU_{\text{ХХ}}}{dT} \cdot (T - T_0),$$

де  $U_{\text{ХХ}0}$  – напруга холостого ходу за нормальних умов;  $(dU_{\text{ХХ}}/dT)$  – температурний градієнт;  $T_0$  – температура комірки за нормальних умов.

6) **Current sweep** – CS. Схожий до Perturb and observe, але за допомогою цього методу з постійним інтервалом досліджується вся навантажувальна крива за рахунок чого унеможлиблюється попадання у локальні максимуми, що не є ТМП. При цьому збільшується час очікування вимірювання, та збільшуються втрати під час неї.

7) **Метод короткого замикання** (Short-Current). Вимірюється струм короткого замикання, та, пропорційно певній константі, знаходиться струм, що відповідає MPP. Формула знаходження струму у ТМП ( $I_{КЗ}$ ) за даним методом виглядає наступним чином:

$$I_{ТМП} \cong k_{кз} \cdot I_{кз} ,$$

де  $k_{кз}$  – константа пропорційності струму в ТМП до струму короткого замикання.

Як і ХХ метод ускладнює схемотехніку, а також збільшує значення максимального струму схеми, при цьому маючи всі попередні недоліки методу ХХ.

Найбільш широко у комерційних виробках використовуються методи збурення і спостереження і диференційного опору через їх зручність реалізації. Якщо дозволено більші похибки знаходження ТМП тоді застосовуються такі методи, як метод постійної напруги, методи холостого ходу та короткого замикання, такі методи є простішими та відповідно недорогі в реалізації.

З розвитком комп'ютерної техніки стали популярними методи пошуку ТМП на основі імовірнісної логіки (fuzzy logic), а також нейронних мереж (Neural Network). Такі системи потребують складної логіки та часу на налаштування та підтримку, а також обчислювальних потужностей. При цьому ці методи потребують уважного налаштування та тренування, при цьому не маючи значних переваг перед класичними методами у малому масштабі.

## 1.4 Порівняння сучасних систем

Для розробки контролеру пошуку ТМП необхідно ознайомитись з вже існуючими моделями контролерів для порівняння їх параметрів та функціоналу. Проаналізувавши ринок контролерів заряду сонячних батарей низької потужності були розглянуті наступні моделі: MOHOO TX1210, Renogy Wanderer-Li (рис. 1.16а), OutBack Power FLEXmax 60 (рис. 1.16б), EPEVER Tracer 1206AN (рис. 1.16в) [21, 22, 23, 24].



Рис. 1.16

В табл. 1.1 відображені основні параметри розглянутих контролерів заряду сонячних батарей.

Головними особливостями наведених моделей можна виділити:

- наявність двох типів пристроїв PWM та MPPT;
- підтримка акумуляторів напругою від 12 В;
- власне споживання близько 10мА;
- наявність портів для підключення додаткових зовнішніх елементів, дисплею.

Таблиця 1.1

	TX1210	Wanderer-Li	FLEXmax 60	Tracer 1206AN
Виробник	MOHOO	Renogy	OutBack Power	EPEVER
Тип	PWM	PWM	MPPT	MPPT
Максимальна напруга на вході (сонячної батареї)	50 В	25 В	150 В	60 В
Напруга на виході (акумулятору)	12/24 В	12 В	12...60 В	8...32В
Струм на виході	10 А	30 А	60 А	10 А
Власне споживання	до 10 mA	до 10 mA	до 1 Вт	до 12 mA
Додатковий функціонал	Дисплей, USB	RS232, IP20	Дисплей, RJ45	Дисплей, RS485, IP30
Температура роботи	-35...60°C	-30...45°C	-40...60°C	-25...50°C

Наявність PWM типу контролерів заряду зумовлена меншою вартістю, при цьому вони мають гіршу ефективність та інші обмеження роботи.

Важливим фактором при побудові контролерів є розробка функціонального та зручного інтерфейсу для користувача, яке б виділяло пристрів з-поміж конкурентів, при цьому не сильно впливаючи на ціну.

### Висновки до розділу 1

1. Розглянуто теорію сонячних батарей, їх структуру, принцип роботи та методику розрахунку параметрів роботи.
2. Проведено аналіз різних схем перетворювачів постійної напруги, розглянувши їх сильні та слабкі сторони, а також наведено залежності вхідної та вихідної напруги схем.

3. Проведено аналіз методів знаходження точки максимальної потужності, зокрема описано основний принцип методу, їх переваги та недоліки.

4. Наведені приклади існуючих комерційних перетворювачів для сонячних батарей та порівняні їх основні параметри.

## 2. РОЗРОБКА І ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

Структурна схема контролера знаходження точки максимальної потужності представлена на рис. 2.1.

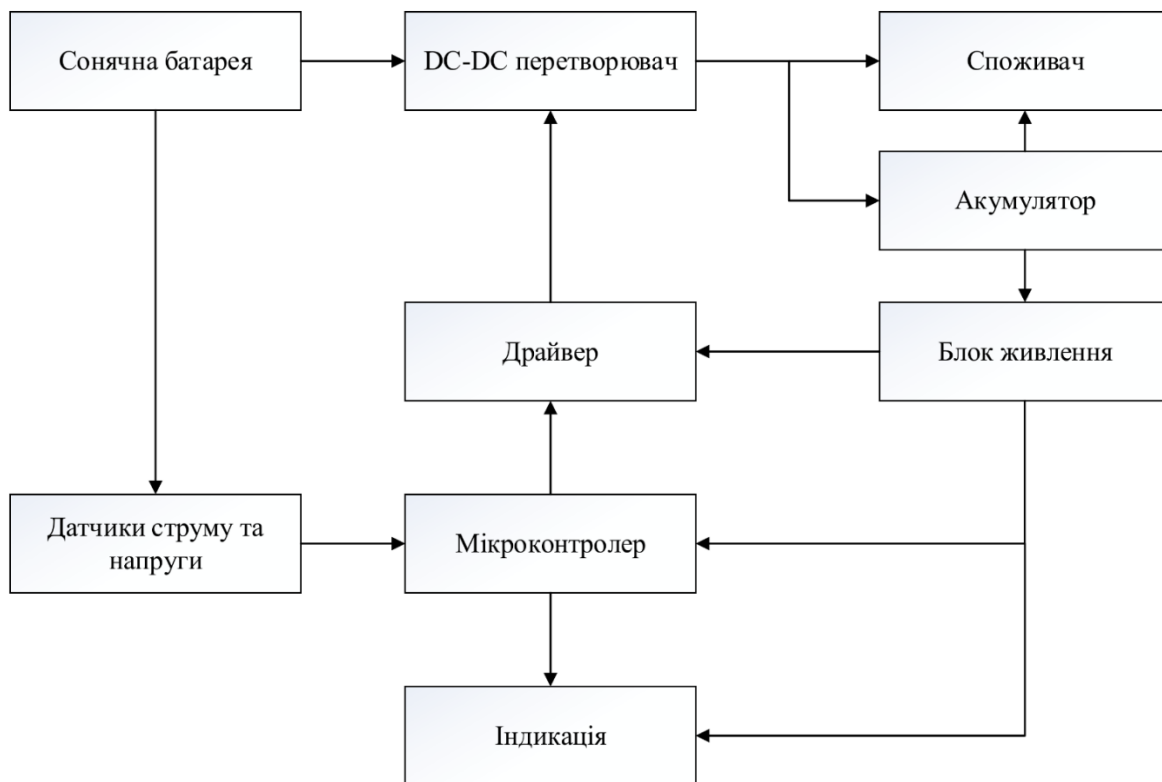


Рис. 2.1

У даній роботі виконується розрахунок, побудова та перевірка системи знаходження точки максимальної потужності сонячної батареї.

Пристрій складається з таких елементів:

- силового перетворювача постійної напруги;
- мікроконтролера;
- драйвер для силових транзисторів перетворювача;
- датчиків струму та напруги;
- блок живлення для системи керування (понижуючий перетворювач постійної напруги);
- індикації для моніторингу роботи.

Основним принципом роботи системи є передача сонячної енергії від сонячної батареї через DC-DC перетворювач до споживача (навантаження). При цьому приведена структурна схема розрахована на постійну напругу, при необхідності роботи на змінну напругу може використовуватися інвертор чи інші додаткові компоненти. Система також має складатися з датчиків струму та напруги. Датчики виконують роль зворотного зв'язку, за допомогою них вимірюється миттєві значення струму та напруги на виході сонячної батареї, ці виміри з датчиків потрапляють до мікроконтролера, який, в залежності від методу пошуку ТМП розраховується отримані покази та вирішує як за допомогою драйверів, керувати силовою частиною схеми. При цьому які значення будуть впливати та як вони будуть обчислюватися та впливати на керування визначається в залежності від методу пошуку ТМП [12].

Драйвери застосовуються для керування силової частини схеми, це відбувається через керування сигналом, що подається на керуючий вивід вибраної силової схеми. Наприклад, при застосуванні польових транзисторів, керування відбувається через значення напруги на виводі затвору. Застосування драйвера необхідне для з'єднання цифрової та силової частин схеми, які не являються сумісними за номінальними параметрами роботи, а також, в залежності від силової схеми, з'являється додаткова необхідність у спеціальній схемі під'єднання.

На даній структурній схемі також представлений акумулятор, що використовується для відбору зайвої потужності, яка не використовується навантаженням, а також стабілізує вихідну потужність під час тимчасово відсутнього сонячного випромінювання.

Додатково на схемі представлено блок живлення системи керування, який в основному представляє собою понижуючий перетворювач постійної напруги та зменшує напругу з акумулятора до постійної стабілізованої напруги з номіналом, що відповідає цифровій логіці. Блок живлення може



використовуватися для живлення мікроконтролеру, драйверу та приладу індикації.

Індикація у системі необхідна для того, щоб користувач міг спостерігати за показами датчиків, а отже за потужністю сонячної батареї та станом зарядженості акумулятора. Приладом індикації можуть виступати як прості світлодіоди, так і дисплей чи інші методи відображення інформації для користувача.

## **Висновки до розділу 2**

Було побудовано структурну схему MPPT-контролера використовуючи всі необхідні для роботи системи елементи. Наведено опис основних елементів системи та як вони взаємодіють між собою.

### **3. РОЗРОБКА І ОБҐРУНТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ**

#### **3.1 Система керування**

##### **3.1.1 Мікроконтролер**

Для вибору мікроконтролеру необхідно слідувати таким основним вимогам:

- необхідна кількість портів для паралельного вводу та виводу сигналів до підключених до нього пристроїв;
- вбудовані чотири канали АЦП одночасного для прийому сигналу з датчиків;
- підтримка інтерфейсів SPI та I2C для підключення екрану для відлагодження та моніторингу роботи, а також можливе розширення функціоналу;
- висока швидкість, надійність та простоту.

Таким вимогам може відповідати багато різних мікроконтролерів, тому в даній роботі буде використовуватись STM32F103C8, який не тільки відповідає заданим параметрам, а ще має низьку вартість та високу поширеність і підтримку розробників [26].

Основні параметри та особливості мікроконтролеру STM32F103C8:

- 32-х бітний ARM процесор з ядром Cortex-M3 та частотою 72 МГц;
- 64 кБайт внутрішньої пам'яті;
- 20 кБайт оперативної пам'яті;
- напруга живлення та портів вводу-виводу 2...3,6 В;
- два 12-бітні АЦП з підтримкою до 16 каналів та робочими напругами 0...3,6 В з можливістю подвійного заміру;
- температурний датчик;

- підтримка до 80 портів вводу-виводу, кожний має можливість під'єднання до 16 зовнішніх переривань та більшість має підтримку 5 В напруги;
- режим відлагоджування за допомогою Serial wire debug (SWD) & JTAG інтерфейсу;
- 7 таймерів, з них три 16-бітні таймера з підтримкою захоплення входу, порівняння виходу, ШІМ або пульсуючого лічильнику;
- 7-канальний DMA контролер для таймерів, АЦП, SPI, I2C та USART;
- до дев'яти інтерфейсів зв'язку: до 2-х I2C, до 3-х USART, 2-х SPI, CAN та USB 2.0;
- невисока вартість.

На рис. 3.1 зображена діаграма внутрішніх блоків МК.

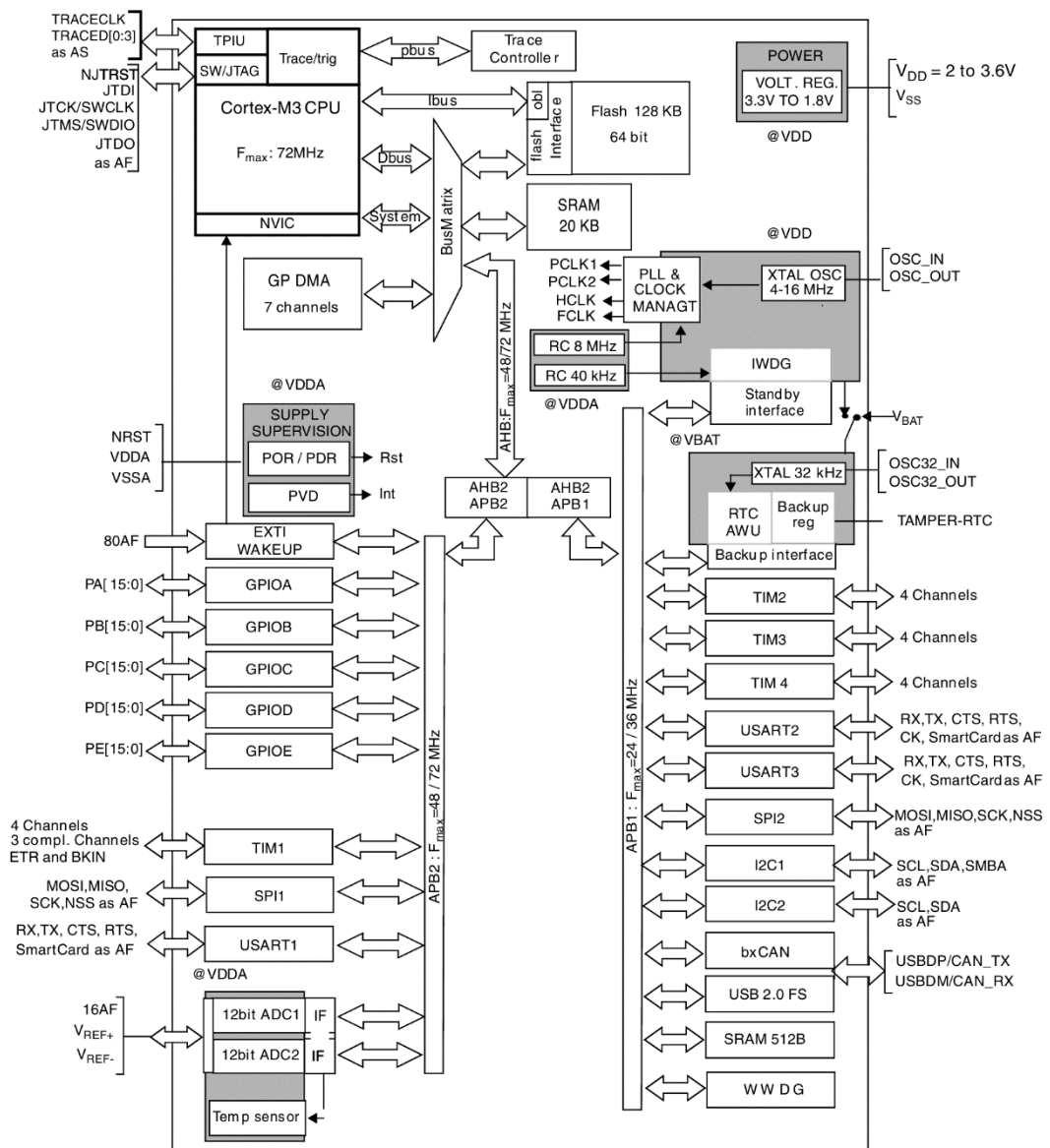


Рис. 3.1

Для побудови та тестування пристрою буде використовуватись плата розробника на основі наведеного МК STM32F103C8, що оснащений необхідними виводами для прошивання і відлагодження програмного забезпечення, зовнішнім кварцовим генератором частоти та регулятором напруги для можливості підключення живлення номіналом 5 В [27]. На рис. 3.2 зображений зовнішній вигляд плата розробника.

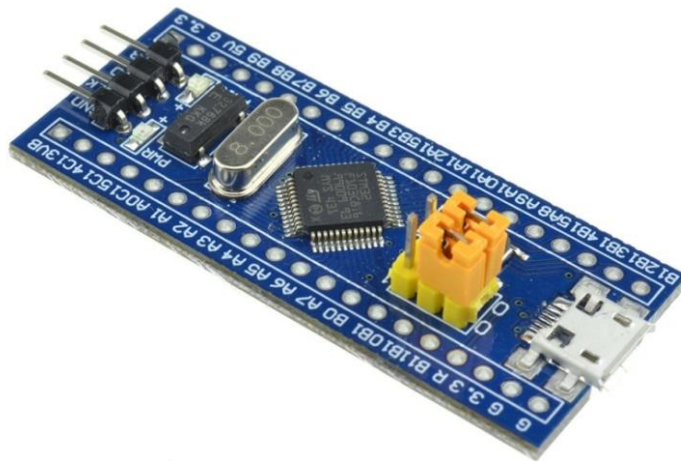


Рис. 3.2

Наведена плата для відлагодження має такі переваги перед використанням окремого МК:

- присутність перетворювача постійної напруги для можливості роботи від 5 В;
- окремі виводи для під'єднання програматора;
- кварцовий резонатор на 8 МГц та додатковий резонатор на 32,768 кГц.
- наявність конденсаторів, резисторів підтяжки, що полегшує проектування та зменшує можливі помилки при зборці;
- microUSB для живлення та можливості прошивання;
- два світлодіоди, що полегшують відлагодження роботи та можуть застосовувати для індикації;

– при наявній несправності можна замінити як окремо МК та і всю плату, через низьку вартість.

З недоліків використання плати розробника є більша ціна та розміри, а також наявність зайвих компонентів, що можуть не застосовуватися у системі, а отже більші втрати енергії.

Отже даній роботі вигідніше застосовувати плату розробника, при цьому для промислового виробництва бажано розробка використання окремого мікроконтролера на одній платі з силовими компонентами.

### 3.1.2 Давач струму

До мікроконтролера необхідно підключити датчики напруги та струму, що відповідатимуть таким параметрам:

- можливість підключення до мікроконтролера
- вимірювання струму: до 3 А;
- вимірювання напруги: до 40 В.

Для задоволення заданих умов був використаний модуль INA169 зображений на рис. 3.3 [28].

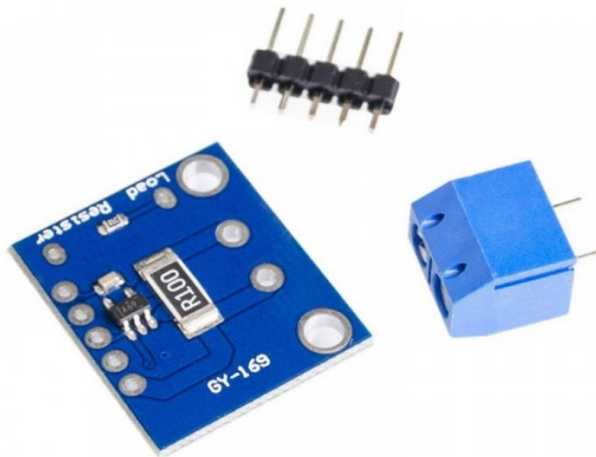


Рис. 3.3

Основними особливостями наведеного модуля є:

- діапазон вимірювання струму: 0-5 А;

- вихід для зняття значення струму має значення напруги, що відповідає струму у пропорціях 1 В на 1 А;
- максимальна напруга на виводах джерела: 2,7...60 В;
- максимальна напруга на виводах споживача: 2,7...60 В;
- мінімальна напруга на виводах джерела/споживача залежить від струму у пропорціях 1 В на 1 А
- модульність.

### 3.1.3 Давач напруги

Для вимірювання напруги часто використовується подільник напруги, через його простоту та надійність. На рис. 3.4 зображена схема подільника, де  $U_{BX}$  – напруга яку необхідно виміряти,  $U_{FB}$  – напруга, що подається на аналого-цифровий перетворювач (АЦП) мікроконтролера,  $I_{FB}$  – струм споживання АЦП. При цьому напруга  $U_{FB}$  не повинна перевищувати максимальну напругу АЦП, а струм  $I_{R1/2}$  повинен бути як мінімум у сто разів більше  $I_{FB}$  для забезпечення похибки меншої за 1%.

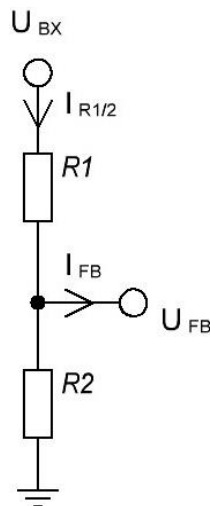


Рис. 3.4

Використовуючи наведену умову можна визначити  $I_{R1/2}$  знаючи значення  $I_{FB}$ , яке представляє струм, що потрапляє до АЦП мікроконтролера, та виходячи з документації дорівнює 1мкА, тоді:

$$I_{R1/2} = 100 \cdot I_{FB} = 100 \cdot 10^{-6} A = 100 \mu A.$$

При цьому можна використовувати й більші значення струму для збільшення точності, але це підвищує втрати потужності наведеному колі.

Далі за законом Ома визначаються значення резисторів, вважаючи напругу на вході перетворювача  $U_{BX}$  рівною 40 В, а напругу  $U_{FB}$  – 3,3 В, тоді:

$$R_2 = \frac{U_{FB}}{I_{R1/2}} = \frac{3,3V}{10^{-4} A} = 33k\Omega,$$

$$R_1 = R_2 \cdot \left( \frac{U_{BX}}{U_{FB}} - 1 \right) = 33k\Omega \cdot \left( \frac{40V}{3,3} - 1 \right) = 367k\Omega.$$

Після цього можна зменшувати опір, щоб зручніше підібрати резистор, але це буде зменшувати ефективність. Отже були вибрані такі значення резисторів:

$$R1 = 33k\Omega; R2 = 300k\Omega.$$

### 3.1.4 Блок живлення системи керування

Блок живлення системи керування необхідний для зменшення напруги на виході силової частини та акумулятора, яка є небезпечно великою для цифрової логіки, навіть враховуючі вбудовані у плати розробника понижуючі перетворювачі, які можуть перетворювати напругу, що досягає 10 В, до робочих значень (у даному випадку 3,3 В). Також можна виділити ще один фактор, через який постає необхідність у застосуванні блоку живлення – це нестабільність напруги на виході силової схеми, що може коливатися у межах напруги акумуляторів.

Враховуючи це, необхідне застосування понижуючого перетворювача постійної напруги з такими параметрами:

- вхідна напруга 12...30 В;
- вихідна напруга 5 В;
- ефективність більша 90%;



- вихідний струм до 1 А;
- невисока ціна.

Відповідно до приведених параметрів був обраний модуль понижуючого перетворювача LM2596 з наступними параметрами [29]:

- вхідна напруга 4,5...40 В;
- вихідна напруга 3...35 В;
- вихідний струм 2 А;
- ефективність 92%;
- споживання без навантаження 6мА;
- резистор підлаштування для установки напруги на виході;
- низька ціна;
- робоча температура -40...85°C.

На рис. 3.5 зображений зовнішній вигляд модуля понижуючого перетворювача LM2596.

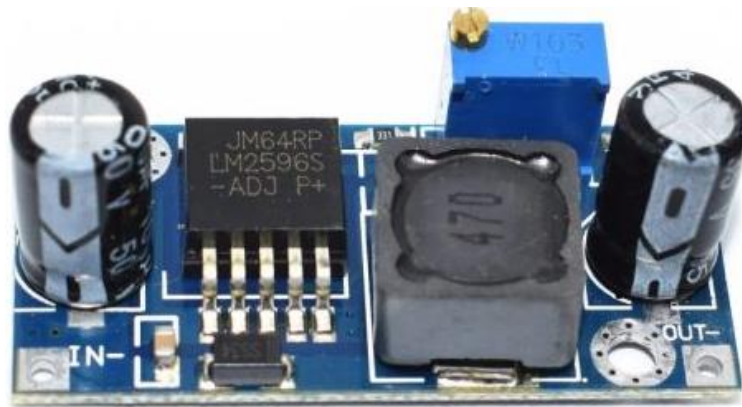


Рис. 3.5

На рис. 3.6 зображено схема модулю, резистором підлаштування тут виступає резистор  $R_2$ , значення якого впливає на вихідну напругу за наступною формулою:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{ref}} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right),$$

де  $U_{ref}$  – постійна напруга значенням 1,23 В;  $R_1$  – постійний резистор зі значенням опору 1 кОм.

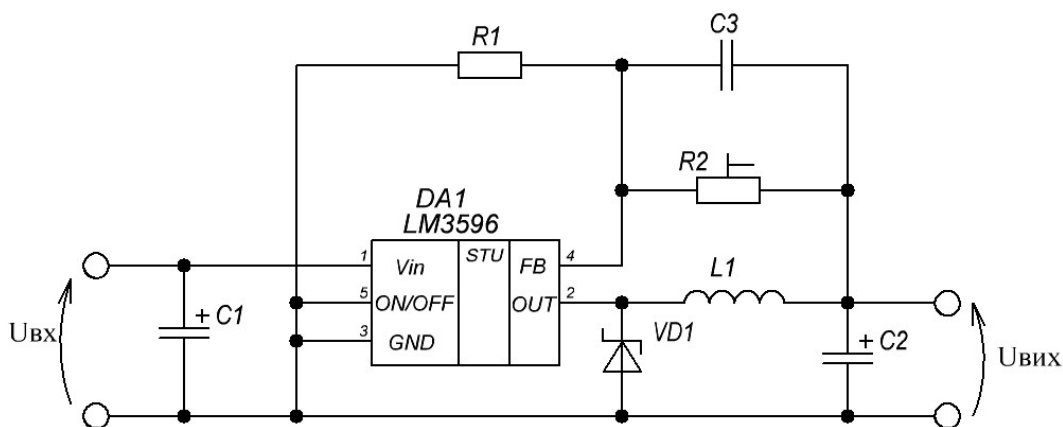


Рис. 3.6

### 3.2 Силова частина

Виходячи з того, що на вході перетворювача знаходиться сонячна батарея, яка може змінювати значення струму та напруги в широкому діапазоні, систему вибирається для різних моделей та конфігурацій батареї на вході та споживачів на виході.

DC-DC перетворювачі діляться на три типи: Buck (понижуючий), Boost (підвищуючий), Buck-Boost (комбінований). Маючи вхідні та вихідні напруги можна вибрати тип DC-DC перетворювача. Для заданих умов треба використовувати Buck-Boost перетворювач.

Серед розглянутих топологій DC-DC було вибрано 2-Switch Buck-Boost перетворювач через наведені переваги та гнучкість керування [13, 30].

2-Switch Buck-Boost перетворювач має такі режими роботи:

1) Buck-Boost. Відбувається керування ШИМ на обидва транзистора. Загальний вигляд схеми у даному режимі представлений на рис. 3.7. Максимальні значення струму на транзисторах, діодах та дроселі досягають значень суми вхідного та вихідного струму. При цьому максимуми напруги для конденсатору C1, транзистору VT1 та діоду VD1 досягають значень вхідної напруги, коли для конденсатору C2, транзистору VT2 та діоду VD2 –

значень вихідної. Напругу на котушці може досягати додатних значень вхідної та від'ємних – вихідної.

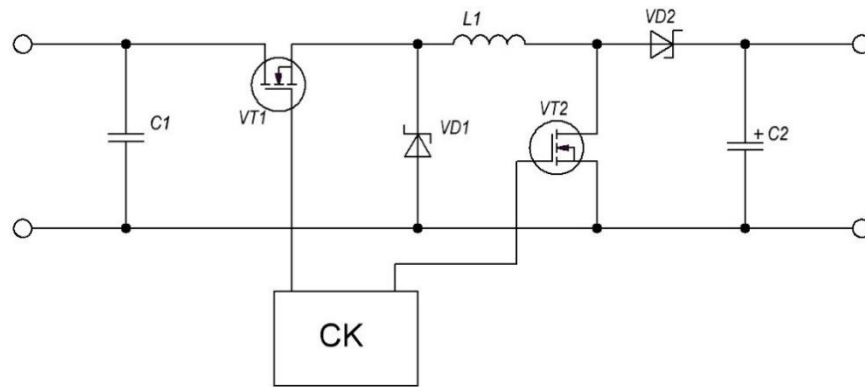


Рис. 3.7

2) Buck. Відбувається керування ШИМ тільки одного (Buck) транзистора, інший завжди розімкнутий. Загальний вигляд схеми, не враховуючи елементів, що не задіяні у роботі, представлено на рис. 3.8.

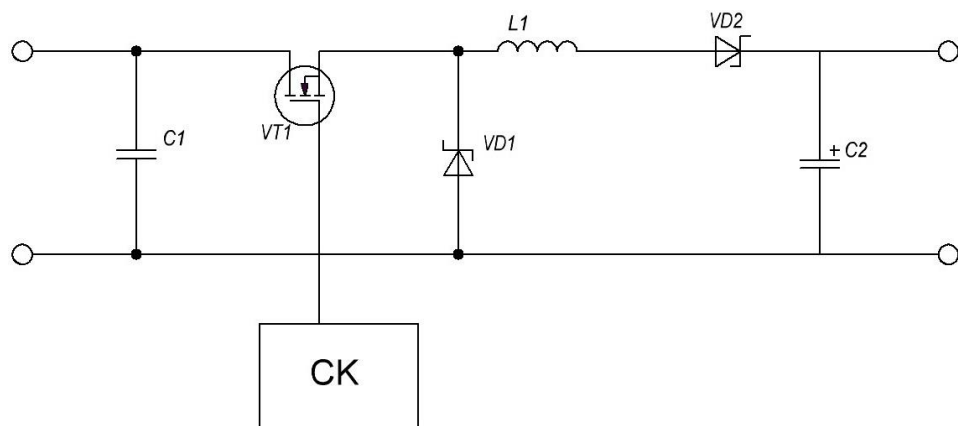


Рис. 3.8

3) Boost. Відбувається керування тільки Boost транзистора, другий завжди відкритий. Отже вигляд схеми, виключивши неробочій транзистор представлено на рис. 3.9.

Для найбільш ефективного використання перетворювача необхідно використовувати Buck режим, якщо необхідне пониження напруги, Boost при підвищенні.

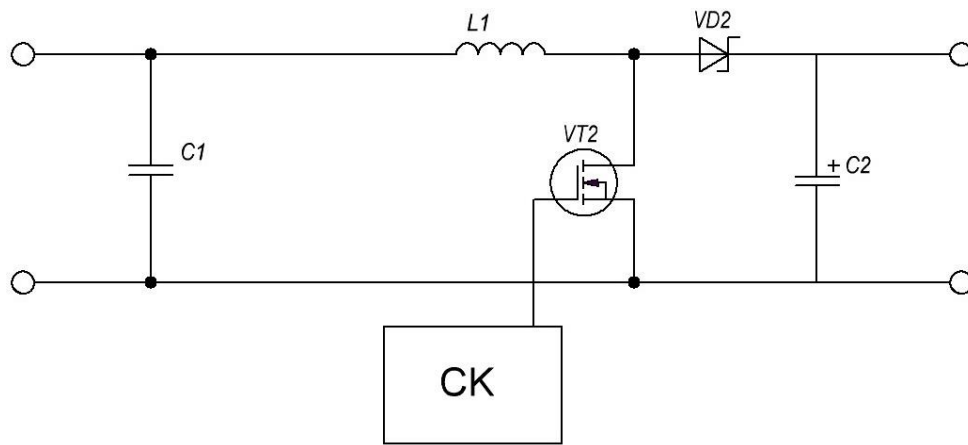


Рис. 3.9

Для визначення типу і розрахунку номіналів компонентів схеми необхідно визначитися з умовами роботи, вхідними та вихідними параметрами.

### 3.2.1 Розрахунок перетворювача постійної напруги

Спочатку треба визначити основні вхідні та вихідні параметри схеми. Ці параметри залежать від пристроїв, що будуть підключатись до перетворювача, а отже від сонячної батареї на вході та споживача та акумулятора на виході:

- напруга холостого ходу сонячної батареї до 28 В;
- при максимальній потужності сонячна батарея видає: 21 В напруги та 1,46 А струму;
- акумулятор на виході напругою 12 В (10,8...14,4 В), а також можливістю підключення двох акумуляторів послідовно (до 29,8 В).

При цьому, якщо струм при максимальній потужності сонячної батареї відповідає приблизно 90% від максимального значення струму (короткого замикання).

Отже, в загальному випадку, схема має наступні діапазони роботи:

- вхідна напруга ( $U_{вх}$ ): 0...30 В;
- вхідний струм ( $I_{вх}$ ): 0...2 А;
- вихідна напруга ( $U_{вих}$ ): 0...30 В;

- вихідний струм ( $I_{\text{вих}}$ ): 0...3 А.

На основі визначень цих параметрів схеми можна дізнатися про робочі струми та напруги кожного елементу схеми, а отже і обрати модель кожного елементу для побудови робочого пристрою [13].

Загальна схема перетворювача зображена на рис. 3.10.

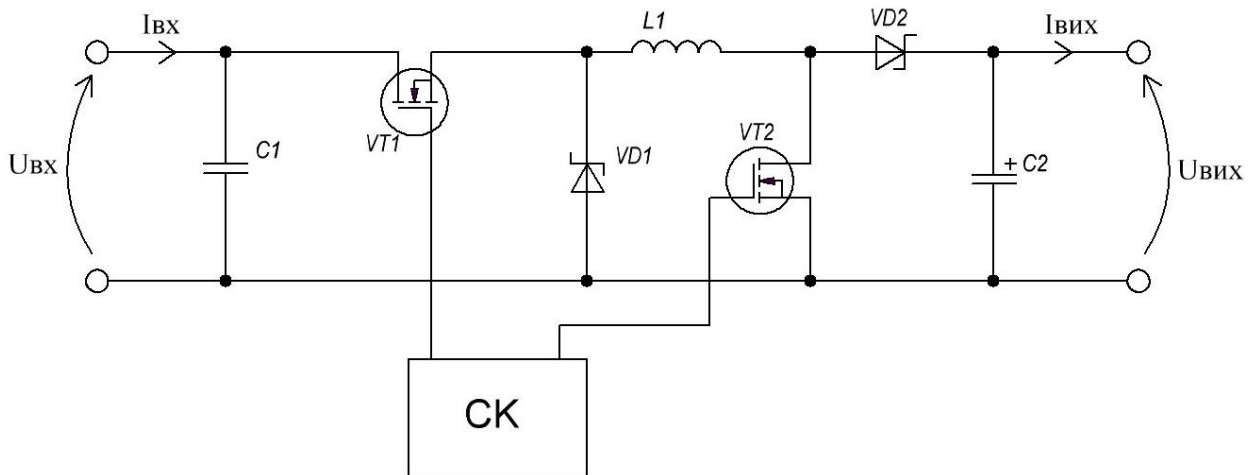


Рис. 3.10

### Розрахунок діодів

Виходячи зі структури схеми, прийнявши напругу відкритого транзистора VT1 рівним нулю, максимальна напруга на діоді VD1 досягає значень вхідної напруги схеми. Струм через діод буде проходити тільки в режимі пониження, це означає, що струм буде коливатися у діапазоні вихідного струму в режимі пониження.

Напруга діоду VD2 у свою чергу досягає значень вихідної у режимі підвищення напруги, при режимі пониження діод завжди замкнутий, що відповідає номінальній напругі діода, яка в основному коливається у межах 0,5...1 В. Середній струм через діод VD2 у понижуючому режимі відповідає вихідному струму. При підвищуючому режимі струм досягає значень вихідного струму.

Відповідно до приведених робочих струму та напруг діодів були вибрані 30BQ100 діоди Шотткі, як для VD1 так і для VD2. Даний діод має наступні параметри:

- прямий струм 3 А;
- максимальна зворотна напруга 100 В;
- напруга при прямому струмі 0,62 В.

### **Розрахунок транзисторів**

Транзистор VT1 у режимі підвищення завжди відкритий, тому струм стік-витоку буде рівний вхідному. При цьому в режимі пониження у відкритому стані струм буде досягати значення на виході. Напруга транзистору VT1 на виводах стік-витік сягає значень вхідної напруги.

Струм транзистору VT2 під час відкривання рівний струму на вході перетворювача, а напруга під час закривання – напрузі на вході.

Також, для вибору транзисторів, необхідно знати частоту їх перемикання. Відповідно до можливостей мікроконтролеру було прийнято частоту перемикання у 50 кГц.

Відповідно до описаних умов був вибраний транзистори IRF7341, який має наступні параметри [31]:

- максимальна напруга стік-витоку: 55 В;
- максимальний струм стоку (при напрузі затвор-витік 10 В та температурі 70°C): 3,8 А;
- пакет включає два n-канальних транзистора;
- максимальна затримка при перемиканні: 50 нс;
- порогова напруга на затворі: 1 В.

### **Розрахунок індуктивності**

Робочі значення струму котушки коливаються в межах вхідного чи вихідного струму перетворювача, в залежності від режиму роботи.

Для визначення необхідної індуктивності, котушка повинна бути розрахованою такою, щоб задовольняти роботу у режимі пониження та підвищення перетворювача. При цьому визначається мінімальне значення індуктивності котушки, збільшуючи значення якої, в основному приводить до підвищення можливості роботи при більших вихідних струмах. Хоча при зменшенні індуктивності зменшуються габарити.

Для режиму пониження індуктивність повинна задовольняти наступну умову:

$$L > \frac{U_{вих} \cdot (U_{вх\max} - U_{вих})}{k_{інд} \cdot F_{перем} \cdot U_{вх\max} \cdot I_{вих\max}}, \quad (3.1)$$

де  $U_{вх\max}$  – максимальна вхідна напруга;  $I_{вих\max}$  – максимальний вихідний струм;  $k_{інд}$  – коефіцієнт, що показує відношення пульсацій струму котушки до максимального струму на виході перетворювача (часто визначають в межах 0,2...0,4);  $F_{перем}$  – частота перемикавання транзисторів перетворювача.

Аналогічно, для режиму підвищення, використовується наступна умова:

$$L > \frac{U_{вх\min}^2 \cdot (U_{вих} - U_{вх\min})}{k_{інд} \cdot F_{перем} \cdot I_{вих\max} \cdot U_{вих}^2}, \quad (3.2)$$

де  $U_{вх\min}$  – мінімальна вхідна напруга.

Прийнявши для режиму пониження  $k_{інд}$  рівним 0,2;  $F_{перем}$  – 50 кГц;  $U_{вх\max}$  – 23 В;  $I_{вих\max}$  – 2 А; а  $U_{вих}$  – 21,6 В, розрахуємо мінімальне значення індуктивності за рівнянням 3.1:

$$L = \frac{21,6В \cdot (23В - 21,6В)}{0,2 \cdot 5 \cdot 10^4 Гц \cdot 23В \cdot 2А} = 6,6 \cdot 10^{-5} Гн.$$

Аналогічно для режиму підвищення, прийнявши:  $k_{інд}$  рівним 0,2;  $F_{перем}$  – 50 кГц;  $U_{вх\min}$  – 5 В;  $I_{вих\max}$  – 2 А; а  $U_{вих}$  – 29 В, відповідно до рівняння 3.2:

$$L = \frac{(5В)^2 \cdot (29В - 5В)}{0,2 \cdot 5 \cdot 10^4 Гц \cdot (29В)^2 \cdot 2А} = 3,6 \cdot 10^{-5} Гн.$$

Після розрахованих мінімальних значень індуктивності було вибрано котушка індуктивністю 110 Гн.



### Розрахунок конденсаторів

Для розрахунку вихідного конденсатора використовуються формули мінімальної ємності для режиму пониження ( $C_{\text{вихminbuck}}$ ) та підвищення ( $C_{\text{вихminboost}}$ ) перетворювача:

$$C_{\text{вихminbuck}} = \frac{k_{\text{ind}} \cdot I_{\text{вих}}}{8 \cdot F_{\text{перем}} \cdot \Delta U_{\text{вих}}},$$

$$C_{\text{вихminboost}} = \frac{I_{\text{вих}} \cdot \gamma_{\text{boost}}}{F_{\text{перем}} \cdot \Delta U_{\text{вих}}},$$

де  $\Delta U_{\text{вих}}$  – пульсації напруги на виході,  $\gamma_{\text{boost}}$  – максимальний коефіцієнт заповнення для режиму підвищення.

Розрахуємо приведені формули підставивши:  $k_{\text{ind}}$  рівним 0,2;  $F_{\text{перем}}$  – 50 кГц;  $\Delta U_{\text{вих}}$  – 0,1 В;  $I_{\text{вих}}$  – 2 А;  $\gamma_{\text{boost}}$  – 0,7.

$$C_{\text{вихminbuck}} = \frac{0,2 \cdot 2 \text{ А}}{8 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ Гц} \cdot 0,1 \text{ В}} = 100 \text{ мкФ},$$

$$C_{\text{вихminboost}} = \frac{2 \text{ А} \cdot 0,7}{5 \cdot 10^{-4} \text{ Гц} \cdot 0,1 \text{ В}} = 280 \text{ мкФ}.$$

Відповідно до розрахунків був вибраний конденсатор EFH471M50B, який має ємність 470 мкФ та номінальна напругу 50 В [32].

### 3.2.2 Драйвер для керування силовими транзисторами

Виходячи зі структури схеми DC-DC перетворювача, виводи одного з транзисторів не з'єднані з землею, через що керування необхідно виконувати відносно одного з виводів транзистора. В даному випадку виникає необхідність використовувати драйвер з гальванічною розв'язкою.

Відповідно до цього необхідно вибрати драйвер, що задовольняє наступні умови:

- гальванічна розв'язка між напругою керування та напругою стік-витік;
- робота на частоті до 50 кГц, для використання ШИМ;
- можливість використовувати для керування напругу з МК;

—достатню для відкриття силового транзистора напругу.

Відповідно до приведених умов було обрано 1EDI20I12MF. Вибраний драйвер має наступні параметри [33]:

- струм керування транзистором 2 А;
- керування транзисторами розрахованими на напругу до 600 В;
- можливість підключення до цифрової логіки в діапазоні напруги 3...15 В;
- типова затримка роботи 300 нс;
- гальванічна ізоляція сигнального виводу від МК та виводів керування транзистором.

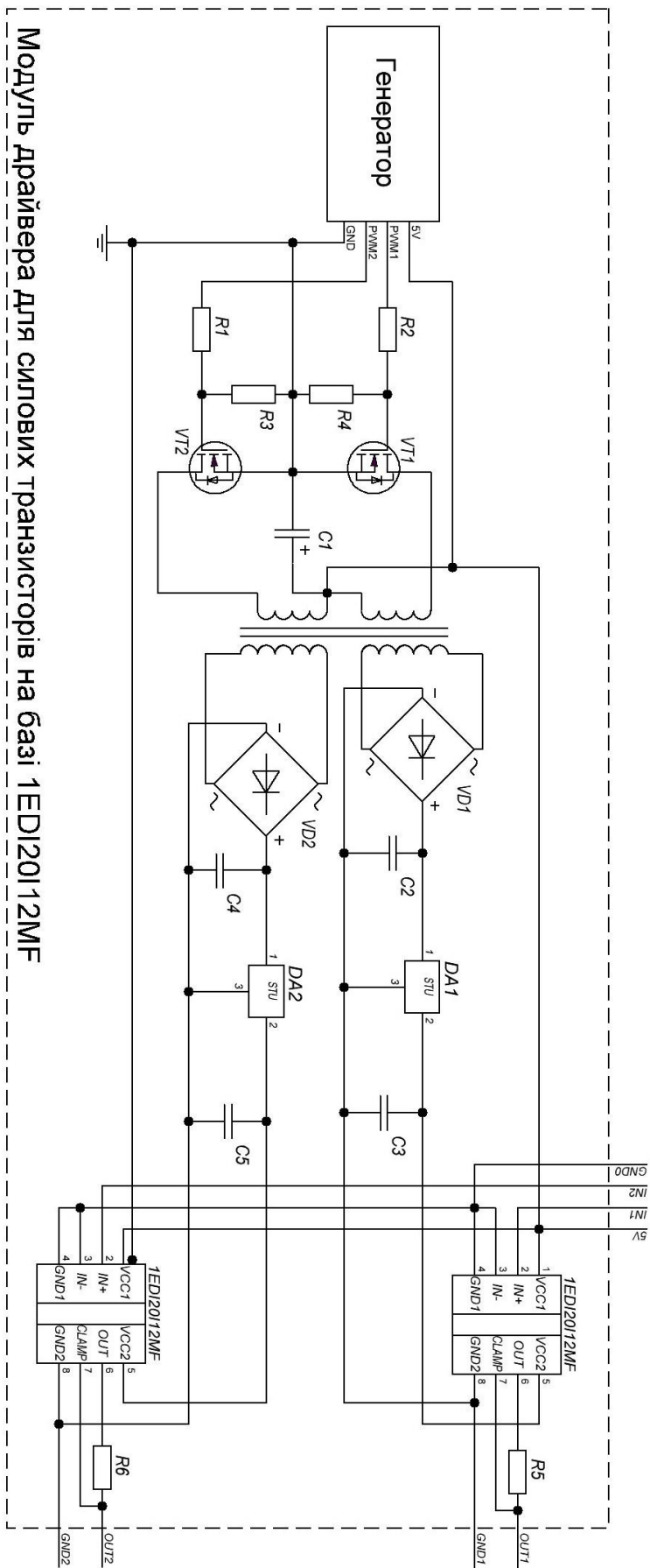
Драйвер 1EDI20I12MF застосовуватиметься для обох транзисторів для того, щоб використовувати уже вибраний драйвер, а не вибирати окремий для кожного транзистора.

До драйверу необхідно забезпечити гальванічно ізольовану напругу, що буде використовуватиметься для керування силовими транзисторами перетворювача. Номінал такої керуючої напруги повинен відповідати напрузі на затворі транзисторів та відповідно бути більшим порогової напруги.

Загальна функціональна схема модулю драйвера зі забезпеченням гальванічно ізольованої напруги зображено на рис. 3.11.

Відповідно до функціональної схеми для отримання гальванічно ізольованої напруги спочатку необхідно виробити змінну напругу, яка отримується за допомогою керуючих сигналів з генератора, що перемикають підключені до трансформатора транзистори VT1 та VT2. Генератором, при цьому, може виступати МК або інші цифрові елементи, що можуть подавати пульсуючу напругу керування для транзисторів. Отримана змінна напруга передається на вторинну обмотку при цьому, рівень землі на первинній обмотці не впливає на вторинну.

Ізольована напруга випрямляється за допомогою діодного мосту та фільтру та подається на вхід драйверу 1EDI20I12MF.



Модуль драйвера для силових транзисторів на базі 1ED120112MF

Рис. 3.11

### **3.3 Інтерфейс користувача**

#### **3.3.1 Дисплей**

Дисплей для даної системи необхідно вибрати дисплей з наступними параметрами:

- можливість підключення до вибраного мікроконтролеру;
- живлення від напруги 5 В;
- невисока ціна;
- відображення значень напруги та струму на вході чи виході, а також іншої інформації для відлагодження роботи.

Виходячи з приведених рекомендацій було обрано OLED дисплей з наступними параметрами [34]:

- діагональ 0,91";
- габарити 38x12мм;
- підключення через інтерфейс I2C;
- живлення від напруги 3,3...6 В;
- драйвер OLED модуля SSD1306;
- роздільна здатність 128x32 пікселів;
- найдешевший варіант для даної конфігурації.

Обраний дисплей має достатню роздільну здатність для відображення близько 12 символів на 3 рядки, що ідеально вкладається в задані умови.

#### **3.3.2 Дистанційний моніторинг та інтерфейс керування для користувача**

Після вибору силової частини та системи керування постає необхідність моніторингу роботи системи пошуку ТМП. При цьому сонячна батарея, до якої підключається система, може розташовуватися поза межами доступу користувача, або бути важкодоступними. До параметрів, що потребують моніторингу відносяться:

- рівень зарядженості акумулятора;

- моніторинг присутності достатньої освітлюваності для забезпечення постійного живлення для споживача.

Виходячи з приведених даних користувачу системи може знадобитися керування наступними параметрами:

- відключення системи;
- блокування роботи силової частини;
- зміна алгоритму роботи пошуку ТМП.

Відключення всієї системи або блокування роботи тільки силової частини може знадобитися через потребу у тимчасовій відсутності необхідності у роботі системи, при деяких окремих випадках нестравності або можливості розряджання чи заряджання акумулятора.

Відповідно до приведених проблем необхідно розробити таке розширення системи:

- можливість підключення до вибраного мікроконтролеру у системі керування;
- безпроводне підключення до пристрою користувача;
- доступність та невелика ціна.

Відповідно до цього було вибрано Wi-Fi модуль ESP8266MOD версії ESP-12E, що має наступні параметри [35]:

- підтримка мов програмування Lua, C++/Arduino, micropython;
- процесор низької потужності частотою роботи 80/160 МГц;
- інтегрована Wi-Fi MAC/BB/RF/PA/LNA антена;
- живлення від напруги 3,3 В;
- 11 портів GPIO;
- флеш-пам'ять 4Мб;
- оперативна пам'ять 80 кб;
- вбудований 10-бітний АЦП;
- підтримка інтерфейсів передачі даних: UART/HSPI/I2C/I2S/IRDA/SDIO 2.0/SPI;
- можливість безпроводного завантаження прошивки;

- середній робочий струм 80мА;
- можливість переходу у режим глибокого сну, під час якого споживання падає до 10мкА, а при повному відключенні – менше 5мкА;
- інтегрована підтримка протоколу IPv4, TCP/UDP/HTTP/FTP;
- підтримка сертифікатів безпеки WPA/WPA2 та WEP/TKIP/AES шифрування;
- бездротові режими роботи: прийом точки доступу, softAP (software enabled access point – можливість пристрою виступати точкою доступу), одночасно SoftAP та прийом точки доступу;
- робота при температурі - 40...85°C.

Через використання Wi-Fi технології користувач може підключатися до системи за допомогою звичайного телефону чи комп'ютеру. Недоліком використання даної технології можна назвати необхідність використання Wi-Fi маршрутизації при роботі в режимі прийому точки доступу, або не дуже високу відстань поширення сигналу особливо при наявних перешкодах. Через потрібно додатково перевіряти розташування системи для доступу користувача та можливу зміну бездротового режиму роботи.

На рис. 3.12 зображено розміщення виводів ESP-12E.

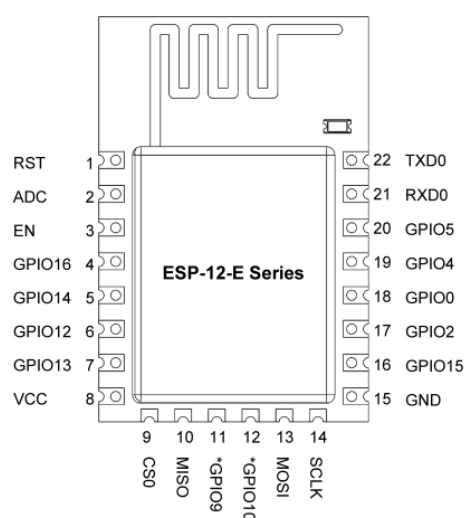


Рис. 3.12

Для розробки системи було використана плата розробки NodeMCU V3 на основі вибраного ESP-12E модуля, що є зручним для розробки та прототипування системи та розширює функціонал такими параметрами:

- перетворювача постійної напруги CH340;
- живлення від напруги до 10 В;
- microUSB інтерфейс для підключення та прошивання через комп'ютер;
- світлодіод;
- дві кнопки для прошивання та перезапуску процесора.

На рис. 3.13 представлений зовнішній вигляд плата розробки NodeMCU V3.



Рис. 3.13

Важливою особливістю модулю також є можливість змінювати режими роботи, що відповідно змінює потужність споживання. Крім режиму сну, на енергоефективність впливають також наявність різних режимів налаштувань передачі сигналу через Wi-Fi. В табл. 3.1. показані типові значення споживання у різних режимах роботи відповідно документації.

Таблиця 3.1

Параметри роботи	Типове значення
Передача сигналу 802.11b	170 мА
Передача сигналу 802.11g	140 мА
Передача сигналу 802.11n	120 мА
Прийом сигналу 802.11b	50 мА
Прийом сигналу 802.11g	56 мА
Прийом сигналу 802.11n	56 мА
Виключений модем Wi-Fi	15 мА
«Легкий сон»	0,9 мА
«Глибокий сон»	10 мкА

Відповідно до табл. 3.1 можна побачити, що основним параметром, що впливає на споживання являється ввімкнений Wi-Fi режим. Режим «легкого сну» означає відключення не тільки роботи модему Wi-Fi, а також процесору, при цьому як і для звичайного відключення модему, з'єднання з мережею може зберігатися. При режимі «глибокого сну» відключаються всі з'єднання Wi-Fi, як і сам модем та процесор, єдиним працюючою частиною залишається RTC (Real-time clock – годинник реального часу), який можна застосовувати для виходу з цього режиму.

Для зменшення споживання можна комбінувати приведені режими роботи та в залежності від потреби їх перемикаєти.

### Висновки до розділу 3

1. Визначені основні параметри необхідні для вибору елементів системи керування та відповідно вибрані мікроконтролер, давачі струму та напруги, а також блок живлення цифрової частини схеми.
2. Вибрана схема перетворювача постійної напруги.
3. Проведений розрахунок елементів перетворювача.
4. Обрано драйвер та схему драйверу для силових транзисторів.
5. Визначені основні параметри необхідні для вибору індикації роботи системи, та відповідно вибрано дисплей, а також модуль для безпроводного зв'язку.



## 4. РОЗРОБКА І ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕСПЕЧЕННЯ

### 4.1 Програмне забезпечення системи керування

Для роботи макету необхідно задати алгоритм роботи системи керування, за основу якого був взятий метод збурення і спостереження. В загальному алгоритм роботи методом збурення і спостереження представлений на рис. 4.1. Для виконання цього алгоритму мікроконтролером треба написати необхідний набір команд, що буде записаний у програмній пам'яті пристрою.

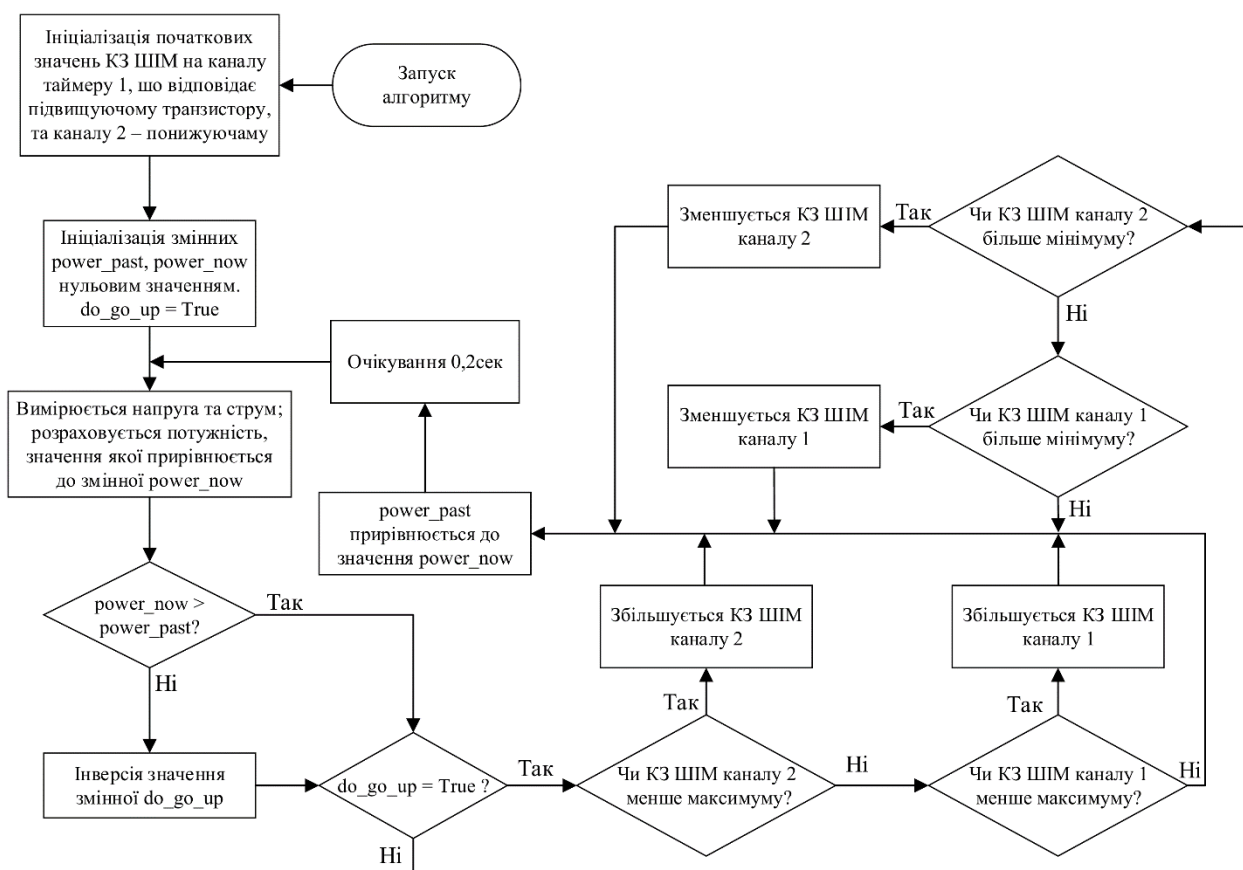


Рис. 4.1

На зображеному алгоритмі зображено використання таких змінних:

- `do_go_up` – бінарна змінна, що показує напрям зміни коефіцієнтів заповнення (КЗ) під час пошуку ТМП, значення `True` відповідає збільшенню КЗ;

- `power_now` – цифрова змінна, що відповідає обчисленому значенню потужності у поточну ітерацію;

- `power_past` – цифрова змінна, що відповідає обчисленому значенню потужності у попередній ітерації;

- також задаються максимальні значення КЗ, при яких система зможе коректно працювати, не перевищуючи максимальні значення на виході.

Для написання прошивки мікроконтролеру буде використовуватись програмне забезпечення `CooCox CoIDE` [36], в якому використовується мова програмування `Cі`. Основною причиною застосування даного ПЗ являється зручність написання програми для `STM` мікроконтролерів та наявність бібліотек, що значно спрощують написання коду для використання.

Далі необхідно визначити, які виводи мікроконтролера будуть використовуватись та для чого. Відповідно до розміщення виводів на платі розробника, що зображена на рис. 3.2, ці виводи були пронумеровані, як зображено на рис. 4.2.

STM32F103C8			
1	VB	CPU	3.3
2	PC13		GND
3	PC14		5V
4	PC15		PB9
5	PA0		PB8
6	PA1		PB7
7	PA2		PB6
8	PA3		PB5
9	PA4		PB4
10	PA5		PB3
11	PA6		PA15
12	PA7		PA12
13	PB0		PA11
14	PB1		PA10
15	PB10		PA9
16	PB11		PA8
17	R		PB15
18	3.3		PB14
19	GND		PB13
20	GND		PB12

Рис. 4.2

У табл. 4.1 перераховані виводи, що використовуватимуться та описані їх призначення.

Таблиця 4.1

<b>№ виводу</b>	<b>Позначення виводу</b>	<b>Призначення виводу</b>
9	PA4	вивід АЦП для вимірювання напруги сонячної батареї
10	PA5	вивід АЦП для вимірювання струму сонячної батареї
11	PA6	вивід АЦП для вимірювання напруги споживача
12	PA7	вивід АЦП для вимірювання струму споживача
15	PB10	SCK2 виводи I2C для підключення ESP-12E
16	PB11	SDA2 виводи I2C для підключення ESP-12E
19, 20, 39	GND	вивід підключення землі живлення
25	PA8	Вивід керування ШИМ понижуючого транзистора
26	PA9	Вивід керування ШИМ підвищуючого транзистора
34	PB6	SCK1 виводи I2C для підключення OLED дисплею
35	PB7	SDA1 виводи I2C для підключення OLED дисплею
38	5V	вивід підключення напруги живлення у 5 В
40	3.3	вивід для підключення живлення до OLED дисплею

Для початку в ПЗ вибирається МК для якого буде виконуватись програмування та стандартні бібліотеки для роботи з виводами, таймерами, ШИМ та АЦП та ін. Після чого, відповідно до алгоритму, був написаний код на мові програмування Сі.

Далі ініціалізуються бібліотеки та змінні та порти вводу/виводу. В загальному ПЗ складається декількох Сі-файлів для того, щоб абстрагувати програмування різних функцій МК:

- `main.c`, головний файл, що ініціалізує стандартні бібліотеки та наступні перераховані файли, а також команди для відлагодження роботи;
- `ADC.c`, для ініціалізації АЦП, вибір каналів та параметрів роботи АЦП;
- `IOs.c`, визначає деякі, які порти вводу/виводу будуть використовуватись;
- `globalvar.c`, визначає глобальні змінні, що використовуються у одразу у кількох файлах;
- `timers.c`, ініціалізує таймери та параметри роботи, а також визначає переривання та включає основну частину алгоритму *perturb and observe*;
- `i2c2esp.c`, що ініціалізує другий канал інтерфейсу I2C.

Основною програмною бібліотекою на якій базується програмування для мікроконтролеру є CMSIS (Cortex Microcontroller Software Interface Standard) [37], зроблений для роботи з процесорами на базі ARM Cortex. Зокрема складовою частиною якого є CMSIS-CORE, що представляє собою програмний інтерфейс для ядра Cortex-M.

Також програмне забезпечення складається з стандартних бібліотек, які вбудовані у офіційний пакет від виробника мікроконтролеру STMicroelectronics, що називаються Standard Peripheral Library (SPL) [38]. Цей набір бібліотек представляє собою функції, що охоплюють роботу всіх периферійних компонентів МК. SPL створена для полегшення програмування шляхом підвищення рівню абстракції.

Загальна блок-схема програмного забезпечення МК приведена на рис. 4.3.

Розглянемо приведені підпрограми. Відповідно до табл. 4.1 позначені порти виділяються для призначених їм функцій. Більша частина підпрограми поєднана у функції `Init_Peripherals(void)`, яка у свою чергу складається з наступних функцій:

- `IOs_Init(void)` – визначена у файлі `IOs.c` функція, що ініціалізує світлодіод вбудований у плату мікроконтролера;



Рис. 4.3

- `Timer1PWM_Init(void)` – визначена у файлі `timers.c` функція, що ініціалізує таймер 1 мікроконтролеру задаючи частоту та інші необхідні параметри, а також визначає порти PA8-PA9, які використовуються для виводу ШІМ-сигналу для керування силовою схемою;

- `Timer2App_Init(void)` – визначена у файлі `timers.c` функція, що ініціалізує таймер 2 задаючи основні параметри роботи таймеру та періодичне переривання, та визначає частоту ітерацій роботи алгоритму пошуку ТМП.

- `Timer3Analog_Init(void)` – визначена у файлі `timers.c` функція, що ініціалізує таймер 3 задаючи переривання, що використовуються для зняття показів з АЦП, зокрема визначення середньо арифметичного значення за певний період, яке і передається для алгоритму пошуку ТМП;

- `ADC_DMA_Init(void)` – визначена у файлі `ADC.c` функція, що ініціалізує АЦП, зокрема порти PA4-PA7, які будуть використовуватися для зняття значень напруги; також тут визначається налаштування прямого доступу до пам'яті (Direct memory access);

- `I2C2_Slave_init(void)` – визначена у файлі `i2c2esp.c` функція, що ініціалізує I2C у режимі slave для прийняття запитуючого сигналу від ESP8266, зокрема порти PB10 та PB11, як SCK2 та SDA2 відповідно, а також події запитів від I2C, які потребують обробки.

## **4.2 Програмне забезпечення для дистанційного моніторингу та керування**

Основними задачами програмного забезпечення повинно бути:

- обробка передачі та прийому I2C сигналу від системи керування;
- забезпечення прийомів чи передачі запитів через мережу Wi-Fi.
- синхронізація запитів через мережу Wi-Fi та I2C сигналів до системи керування.

Після визначення задач ПЗ необхідно визначити мову програмування для побудови ПЗ. Як уже було написано в описі вибраний модуль для дистанційного моніторингу (ESP8266) підтримує такі мови програмування як NodeMCU (Lua) [39], Arduino (C++) [40], micropython [41]. Серед приведених

засобів програмування був вибраний micropython, перевагами та особливостями якого є:

- реалізація для мікроконтролерів популярної мови програмування Python 3, що полегшує вивчення мови та дає можливість використання фрагментів коду з Python;

- інтерпретована мова програмування, за рахунок чого можна швидко перевіряти працездатність фрагментів програмного коду, а також одразу змінювати та перевіряти зміни;

- наявність файлової системи, через що можна легко відокремлювати бібліотеки, основну програму та файли з даними;

- можливість використання WebREPL [42], що дає можливість, не підключаючись безпосередньо до комп'ютера, виконувати команди, а також завантажувати файли на мікроконтролер через мережу Wi-Fi;

- наявність всіх основних бібліотек для роботи з мікроконтролером

Недоліком можна назвати меншу швидкодію у порівнянні до C++, але для даної задачі ці мінімальні затримки не є критичними та не заважають передачі сигналу через I2C та Wi-Fi.

Далі необхідно визначити, які виводи мікроконтролера будуть використовуватись та для чого. Відповідно до розміщення виводів на платі розробника, ці виводи були пронумеровані, як зображено на рис. 4.4.

Для підключення до системи керування контролеру знаходження ТМП необхідно підключити два виводи для використання протоколу передачі даних I2C, також необхідно підключити виводи живлення. Живлення при цьому можливо через USB чи спеціальний вивід Vin, що приходить на вхід вбудованого перетворювача чи через порти 3V. При використанні порту 3V використовується найменша кількість потужності через відсутність втрат на перетворювачі, але з'являється необхідність використовувати обмежений діапазон напруги у 3...3,6 В.

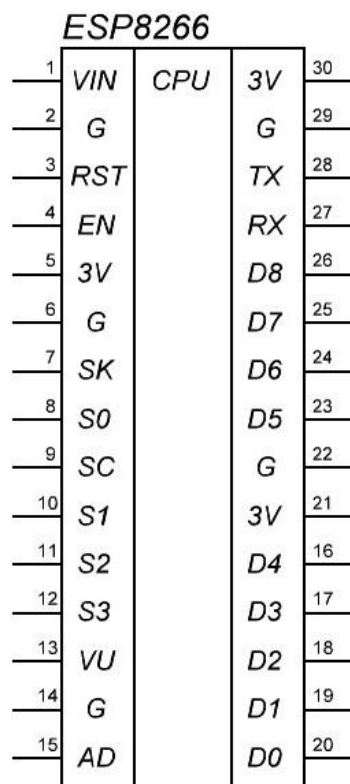


Рис. 4.4

У табл. 4.2 перераховані виводи, що використовуватимуться, а також приведено їх призначення.

Таблиця 4.2

№ виводу	Позначення виводу	Призначення виводу
1	VIN	вивід напруги 3,3 В живлення
2	G	вивід землі живлення
18	D2	вивід загального призначення GPIO4, що використовуватиметься як вивід SDA для протоколу передачі даних I2C
19	D1	вивід загального призначення GPIO5, що використовуватиметься як вивід SCL для протоколу передачі даних I2C

Для побудови програмного коду на мові micropython спочатку для роботи задаються усі бібліотеки, що будуть використовуватися програмою, до них належать:



- machine: для роботи з портами вводу-виводу, таймерами, годинником реального часу, протоколами передачі даних I2C, SPI, UART, АЦП та налаштування режиму глибоко сну.

- network: для налаштування режимів підключення мережі Wi-Fi;

- socket: забезпечує доступ до інтерфейсу сокету Берклі для передачі пакетів через інтернет;

- webrepl: бібліотека REPL over WebSockets, що забезпечує цикл читання-обчислення-друку через бездротову мережу, що дає можливість завантажувати файли програмного забезпечення та виконувати будь-які команди не підключаючись безпосередньо до мікроконтролера.

Після визначення бібліотек, що будуть використовуватись програмою, налаштовується режим роботи Wi-Fi, відповідно до документації можна використовувати такі режими:

- режим точки доступу: мікроконтролер сам виступає як точка доступу Wi-Fi до якої можуть під'єднуватись пристрої, при цьому необхідно задати назву точки доступу для розпізнавання ТД та пароль для фільтрації від несанкціонованого доступу до ТД

- підключення до існуючої Wi-Fi мережі: МК при цьому підключається до вже існуючої ТЧ, при ініціалізації задається ім'я та пароль ТД до якої необхідно підключитись.

- комбінований: одночасне використання двох попередніх методів, які послідовно ініціалізуються.

При розробці також використовується REPL over WebSockets, що використовується для отримання виводу інформації відлагодження та можливості завантаження файлів, включаючи файли прошивки, а також можливості виконувати команди у режимі реального часу.

Алгоритм роботи ESP8266 зображено на рис. 4.5.

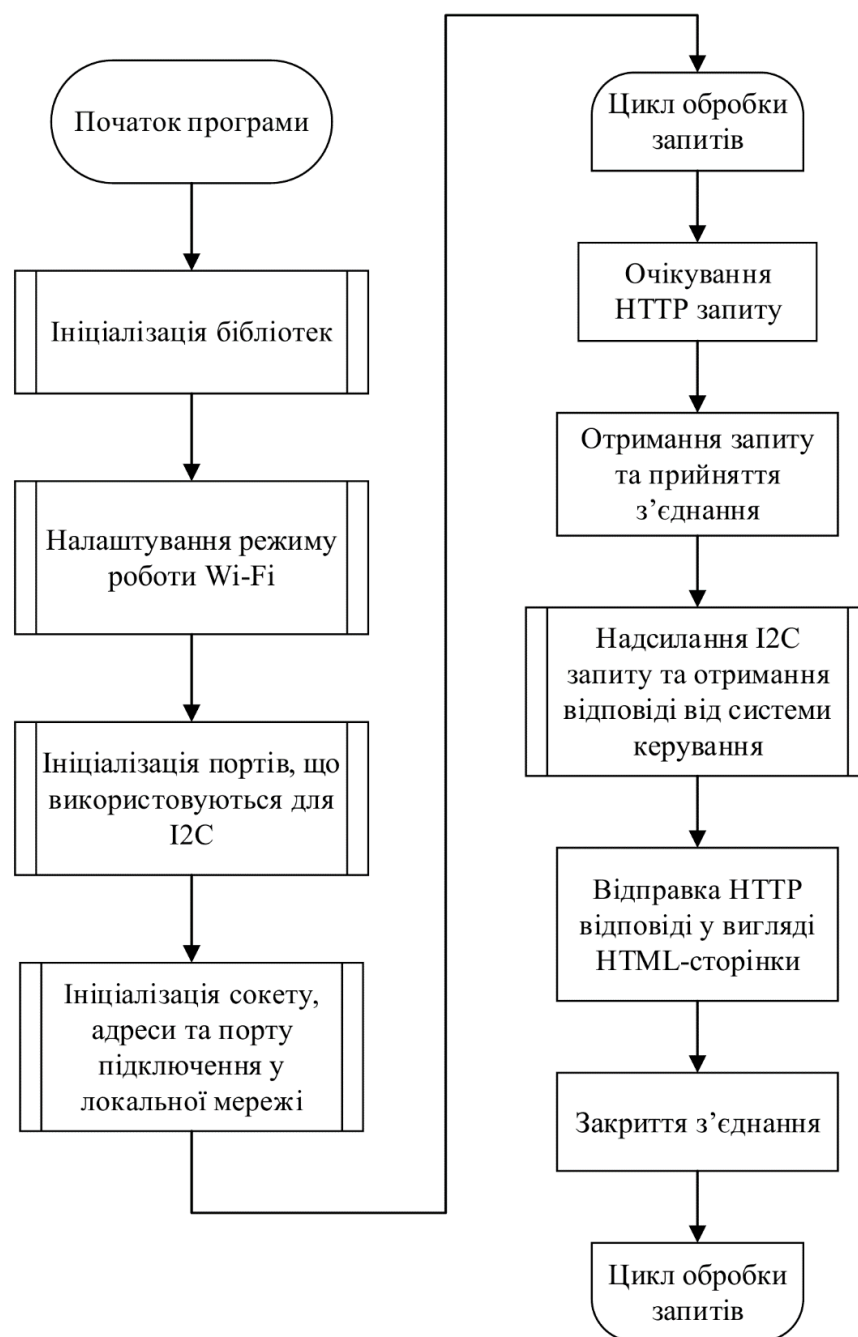


Рис. 4.5

Наступним кроком є визначення портів для роботи з протоколом передачі даних I2C для зв'язку з мікроконтролером, що керує системою знаходження ТМП, задавши при цьому приведені у таблиці 4.2 номери портів GPIO. Далі перевіряється доступність підключених пристроїв I2C для того, щоб відпрацювати ситуацію відсутності з'єднання, а також для зручності додавання інших пристроїв до шини протоколу I2C.

Для того, щоб отримувати запити від користувача необхідно ініціалізувати серверний сокет. При цьому визначається адреса та порт, за якими можна буде з'єднатися за допомогою іншого пристрою. Також задається максимальна кількість користувачів, перевищивши які не можна буде з'єднуватися, а при одночасному з'єднанні – не ставати у чергу на обробку запиту.

Для отримання інформаційної сторінки користувач повинен зробити звичайний HTTP запит на локальну адресу пристрою у мережі, при цьому адреса може змінюватись та потребує прив'язки у налаштуваннях маршрутизатора мережі. HTTP запит зазвичай виконують у інтернет браузері, що доступні для багатьох пристроїв, що підключаються до мережі, як наприклад ноутбук чи смартфон [43, 45]. Отримана інформаційна сторінка має стандартну для читання браузером структуру, та без перешкод може зображувати основні елементи графічного інтерфейсу.

Загальна структура з'єднання зображена на рис. 4.6.

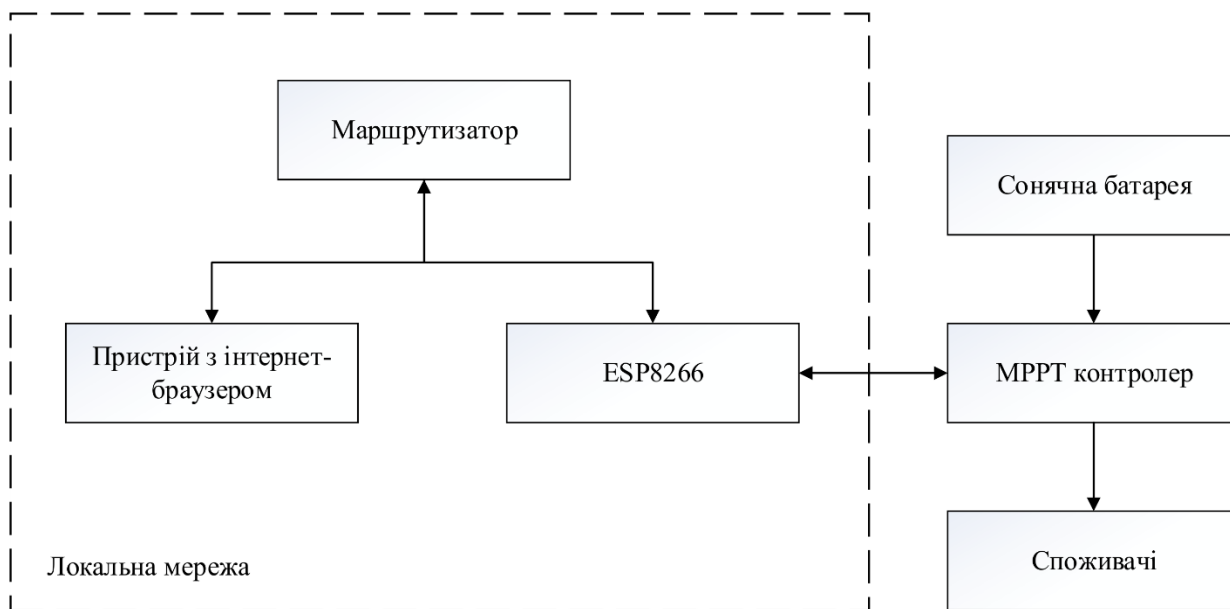


Рис. 4.6

У даному випадку передбачається отримання запитів по локальній мережі, при цьому можливе отримання сигналу через мережу Інтернет

використовуючи налаштування маршрутизаторів, а також використанням серверу чи хмарних технологій для забезпечення безпеки та конфіденційності передачі сигналу.

Використання HTML сторінки відкриває можливості використовувати POST запити, за допомогою яких можна оновлювати дані не оновлюючи усю сторінку, а також імплементувати елементи інтерфейсу для зміни параметрів роботи системи, зокрема кнопки та поля вводу тексту [44].

Це відкриває великий спектр можливостей для вдосконалення та отримання максимальної кількості інформації від MPPT контролеру, а також мати повний контроль за роботою системи.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Визначений алгоритм роботи системи керування.
2. Визначені робочі виводи які будуть використовуватися програмним забезпеченням.
3. Описані основні інструменти програмування, бібліотеки для роботи з вибраним мікроконтролером.
4. Розроблено програмне забезпечення для мікроконтролерів та описані складові частини програми, їх призначення.
5. Розглянуто основну структуру підключення до мережі Інтернет та можливі варіанти використання мережі.

## 5. ПОБУДОВА ТА ТЕСТУВАННЯ ПРИСТРОЮ

В загальному випадку сонячну батарею представляють як ідеальне джерело струму з паралельно під'єднаними діодом та шунтом, а також послідовним резистором (рис. 5.1).

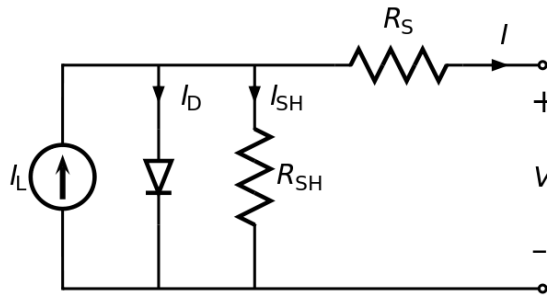


Рис. 5.1

З приведенного еквівалентної схеми можна вивести таке рівняння:

$$I = I_L - I_D - I_{SH}, \quad (5.1)$$

де  $I$  – вихідний струм батареї;  $I_L$  – фотозгенерований струм;  $I_D$  – струм діоду;  $I_{SH}$  – струм шунта.

Розписавши рівняння для кожного струму та підставивши у приведені рівняння можна вивести:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{U + IR_S}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{U + IR_S}{R_{SH}}, \quad (5.2)$$

де  $I_0$  – зворотній струм насичення діода;  $U$  – вихідна напруга сонячної батареї;  $R_S$  – опір послідовного резистору;  $R_{SH}$  – опір шунту;  $n$  – коефіцієнт ідеальності діоду;  $V_T$  – теплова напруга (при  $25^\circ\text{C}$   $V_T \approx 0,0259$  В).

Для вирішення поставлених задач необхідно побудувати експериментальну установку та розробити метод перевірки роботи при різних можливих параметрах роботи сонячної батареї.

Виходячи з опису принципової схеми була розроблена друкована плата експериментального макету контролера знаходження ТМП. Основними етапами збору плати, які будуть використовуватись у даній роботі:

1) побудова принципової схеми в програмному редакторі, в даному випадку було вибрано програму DipTrace [46];

2) розміщення вибраних елементів схеми, з прив'язаним зображенням на друкованій платі, при відсутності зображення у стандартних бібліотеках, будуються відповідно до технічного опису;

3) перенесення схеми у редактор друкованих плат, розміщення елементів та вибір розміру плати;

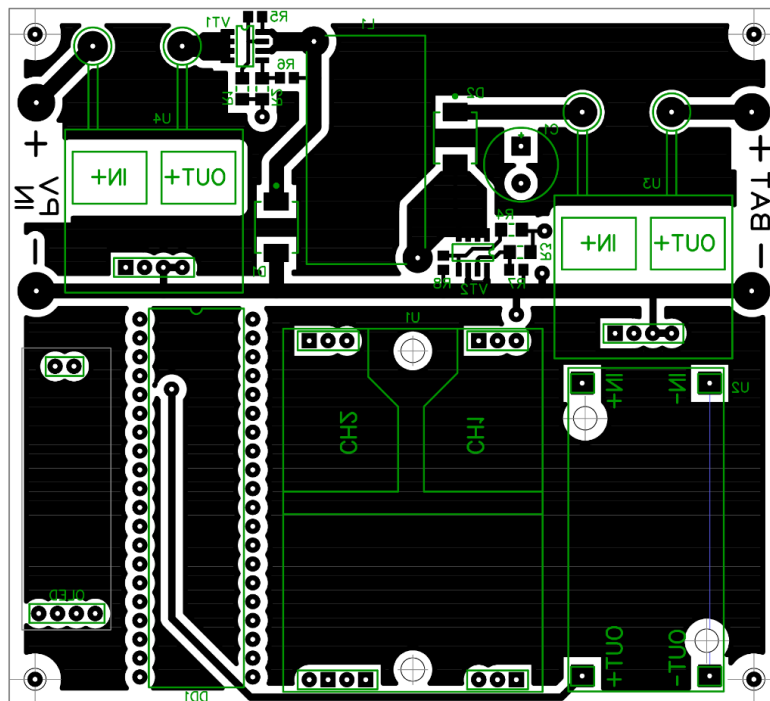
4) трасування доріжок плати;

5) нанесення отриманого рисунку плати на склотекстоліт;

6) розміщення отворів для елементів;

7) спаювання контактів елементів до друкованої плати.

На рис. 5.2 зображено результат виконання перших трьох пунктів та являє собою зображення доріжок плати, отворів та деякі маркування з нижньої (рис. 5.2а) та верхньої сторони (рис. 5.2б). Загальні розміри плати 104мм на 94 мм.



a)

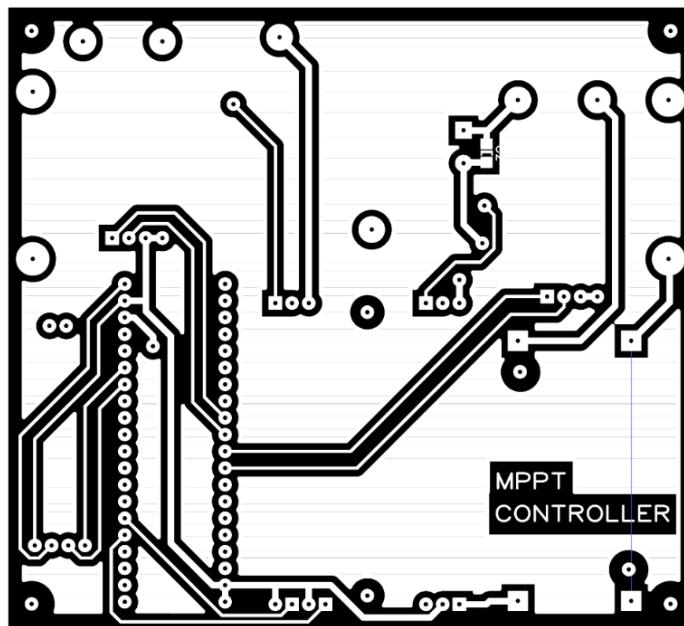
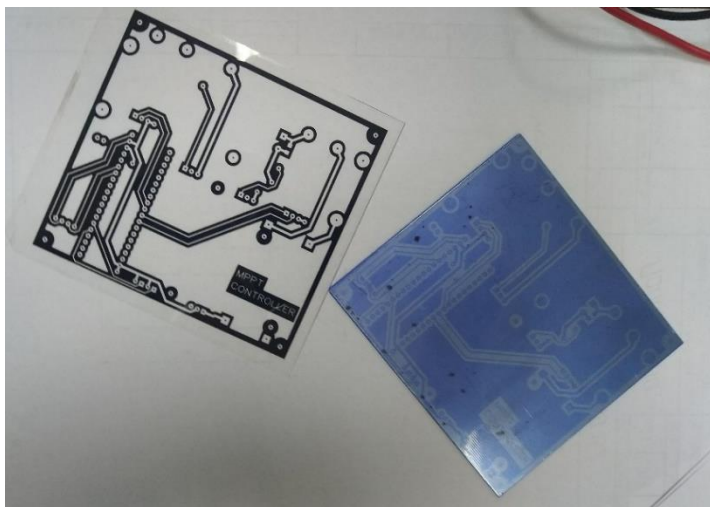
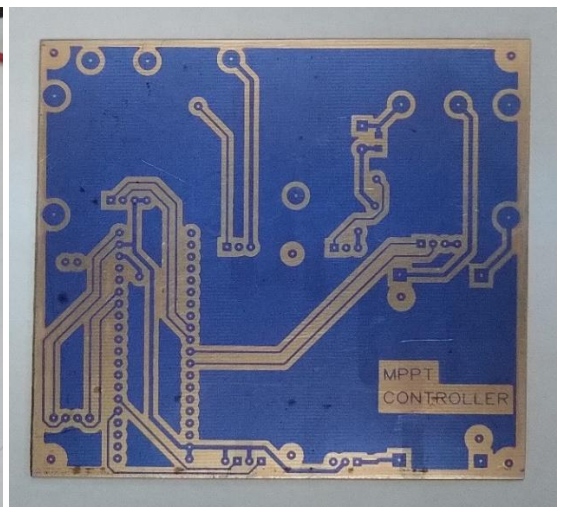


Рис. 5.2 б)

Відповідно до розмірів плати був відрізаний шматок склотекстоліту відповідного розміру, на який був наклеєний плівковий фоторезист. Окремо на прозору плівку було надруковане зображення плати з програми DipTrace (рис. 5.3а). Плівка з нанесеним зображенням розміщується на текстоліті з фоторезистом, після чого відбувається експонування фоторезиста, через що на ньому з'являється рисунок плати. Освітлені ділянки фоторезисту змінюють свою розчинність і їх можна видалити хімічним способом (рис. 5.3б).



а

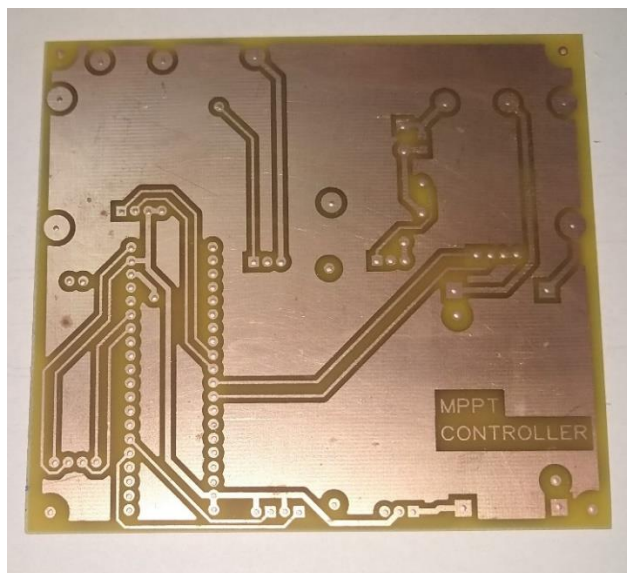


б

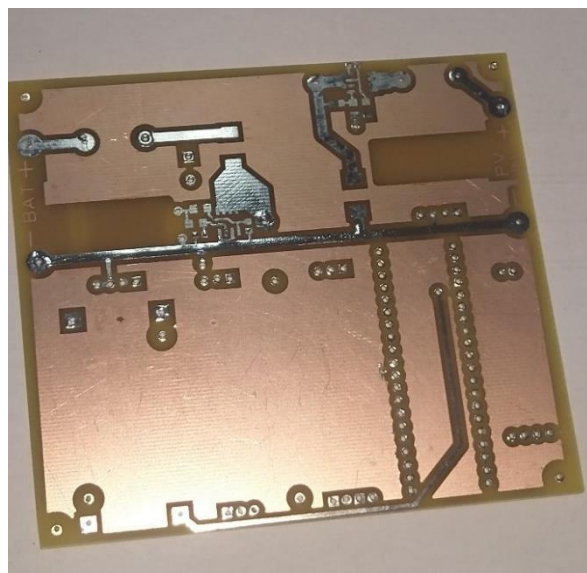


Рис. 5.3

За допомогою травлення знімається вільний від фоторезисту шар металу. На рис. 5.4 зображено дві сторони друкованої плати після зняття залишків фоторезисту.



а



б

Рис. 5.4

Далі необхідно зробити отвори для розміщення та пайки компонентів до плати. Загальний результат збору зображено на рис. 5.5.

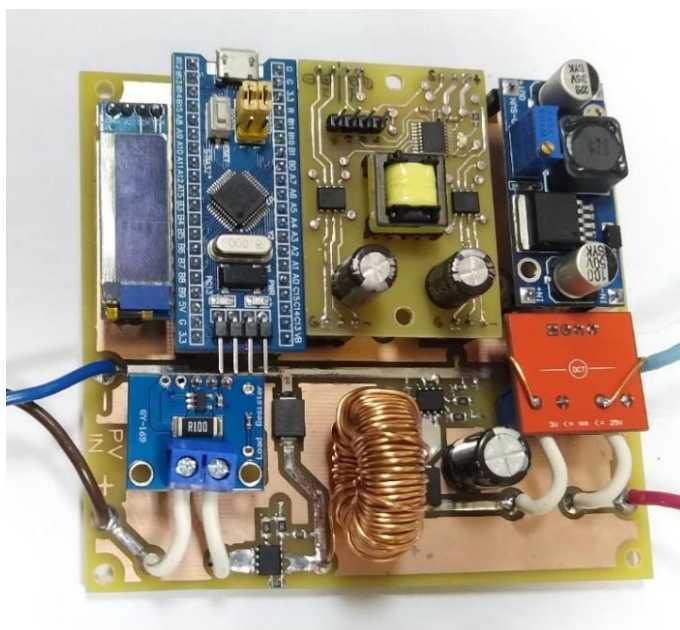




Рис. 5.5

Мікроконтролер прошивається, отриманим після компіляції приведеного у додатку коду, бінарним файлом. Всі модулі МК, драйверу, екрану, блоку живлення підключаються до основної друкованої плати.

На рис. 5.6 зображено часові діаграми керуючої напруги, що подається на транзистори під час переходу перетворювача з понижуючого до підвищуючого режиму роботи. Коефіцієнт заповнення першого транзистора (VT1 на рис. 3.8) досягає максимуму на 40 мкс (рис. 5.6 а), при цьому в цей же момент другий транзистор (VT2 на рис. 3.8) починає відкриватися, а коефіцієнт заповнення стає більшим нуля (рис. 5.6 б).

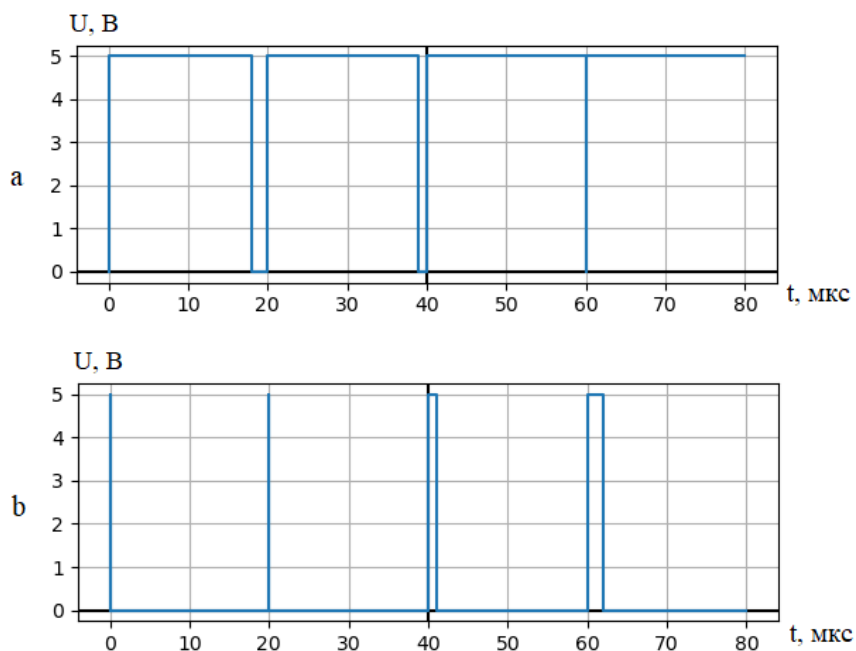


Рис. 5.6

Після цього перевіримо сигнали в реальності напруги на затворі транзисторів під час роботи системи. На рисунку зображений один з виходів драйверу, який підключається до затвору силового транзистору. Масштаб по вертикалі: одна клітинка по вертикалі відповідає значенню напруги у 5 В; по горизонталі – 20 мкс на клітинку.

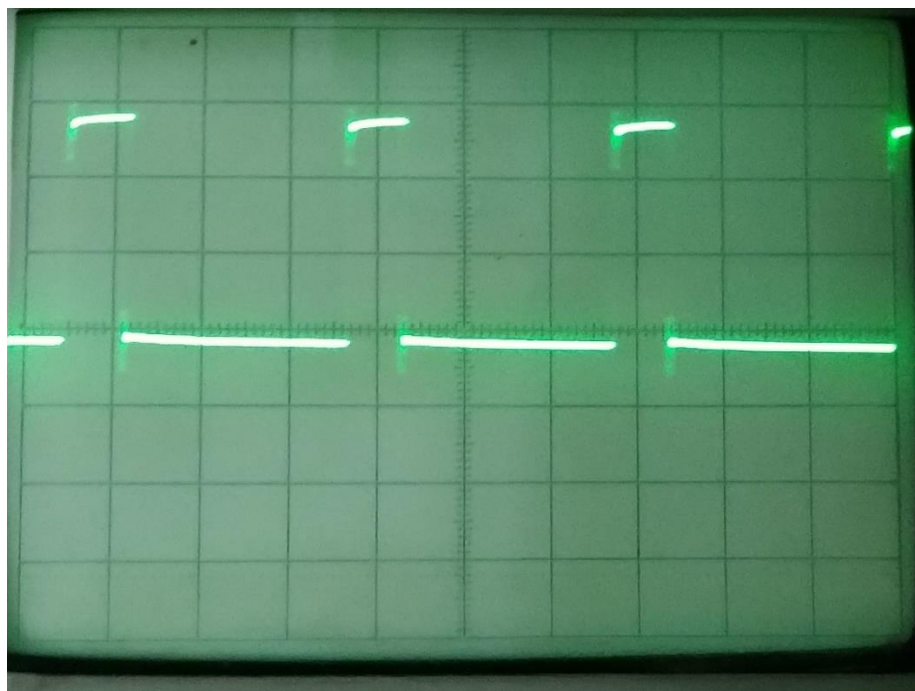


Рис. 5.7

На рис. 5.7 зображена гальванічно ізольована від загальної землі напруга, яка представляє собою імпульси широтно-імпульсної модуляції від мікроконтролера при коефіцієнті заповнення відповідно до показів мікроконтролера складає 0,2. Відповідно до масштабу поділок напруга у максимумі досягає трьох клітинок по вертикалі, що дорівнює величині напруги у 15 В. Таким же чином обрахуємо реальне значення частоти, в даному випадку період займає близько трьох клітинок, що відповідає значенню 60 мкс, при цьому частота знаходиться за формулою  $f = 1/T$ , де  $f$  – частота,  $T$  – період. Отже частота дорівнює значення близько 16,6 кГц.

Далі запустимо схему та знімемо напругу на затворі транзистора у ТМП. Підключимо до входу системи блок живлення на 15 В та струмом до 1А, що замінить СБ, а на виході – акумулятор напругою 12 В, напруга якого при повному заряді досягає значення 14,4 В. Ця напруга відповідає номінальній напрузі зазначеній у документації до драйверу, а отже є достатньою для перемикання вибраного транзистору.

На рис. 5.8 зображена напруга затворі транзистора у ТМП, масштаб збігається з попередньою осцилограмою.

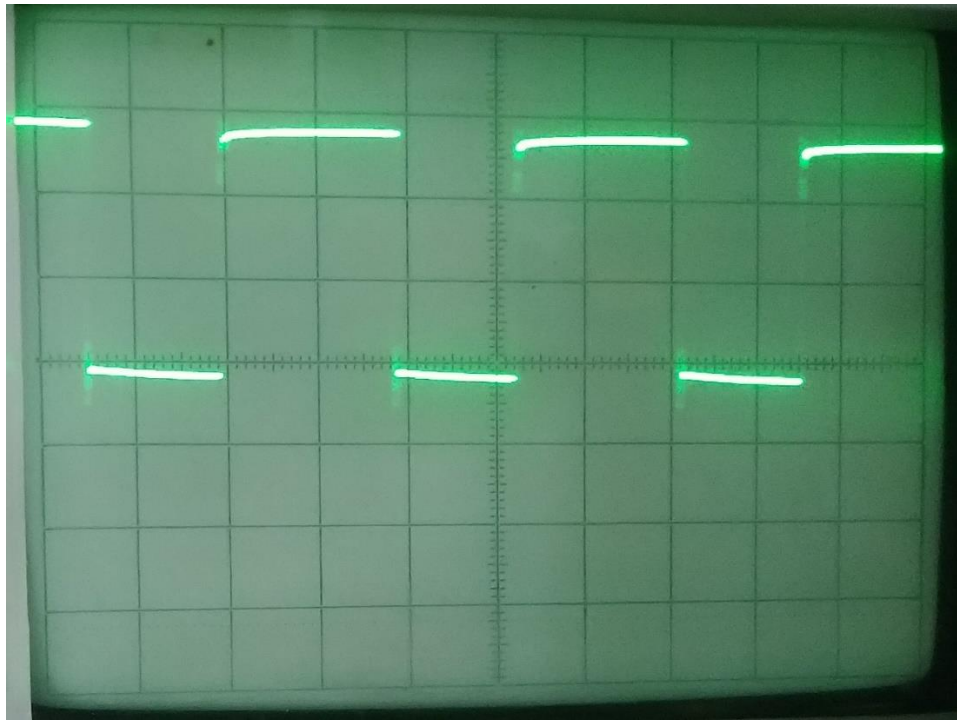


Рис. 5.8

При цьому коефіцієнт заповнення для цієї ШІМ напруги відповідно до показів мікроконтролера складає 0,58.

Далі дослідимо напругу стоку-витоку транзистора у тих самих умовах у ТМІІ та такого само коефіцієнту заповнення ШІМ. На рис. 5.9 можна побачити напругу стоку-витоку, масштаб співпадає з попереднім рисунком напруги.

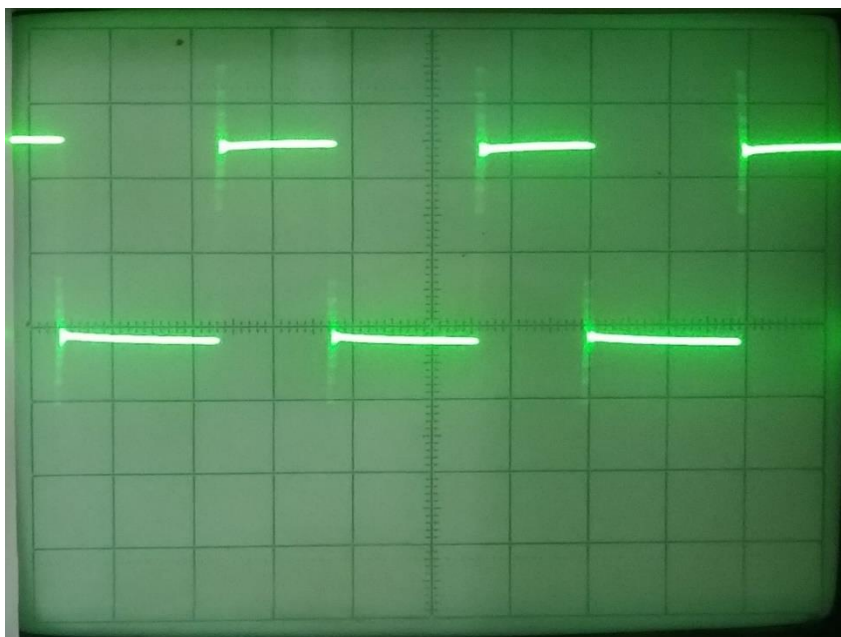


Рис. 5.9

Для емуляції роботи сонячної батареї та зміни освітленості аналітично було побудовано ВАХ сонячної батареї при різних рівнях освітленості.

Використовуючи рівняння 1.5 та підставивши типові значення коефіцієнтів  $n$ ,  $V_T$ , та підібрані значення  $I_L$ ,  $I_0$ ,  $R_S$ ,  $R_{SH}$ , для побудови близької до реальної ВАХ. Отримавши рівняння ВАХ, можна змінювати значення фотозгенерованого струму  $I_L$ , що відповідає зміні освітленості. На рис. 5.10 зображені криві навантаження СБ та прямі, що лінійно апроксимують криві у околі точки максимальної потужності (I-III).

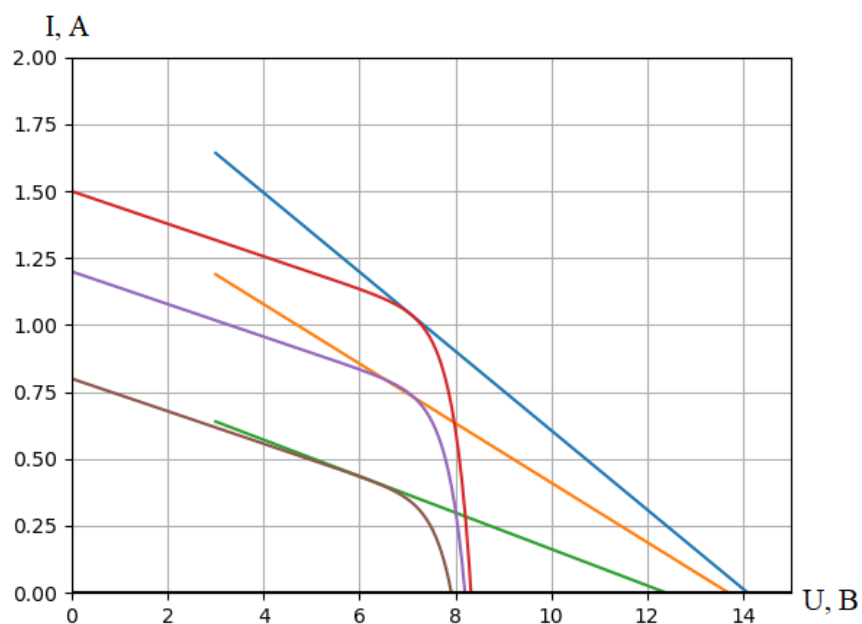


Рис. 5.10

Отримавши аналітичні рівняння прямих можна знайти необхідні значення для відтворення цих прямих за допомогою джерела живлення з регульованою напругою та резистора з'єднаних послідовно та підключених до входу системи замість СБ. Отже пряма I відповідає значенню напруги джерела живлення 14,1 В та послідовного опору ( $R_S$ ) 6,76 Ом; пряма II відповідно 13,7 В та 9 Ом; пряма III – 12,4 В та 14,7 Ом.

Розглянемо роботу у режимі, зображених на рис. 5.11, вольт-амперних характеристик на вході системи, починаючи з точки холостого ходу прямої I.

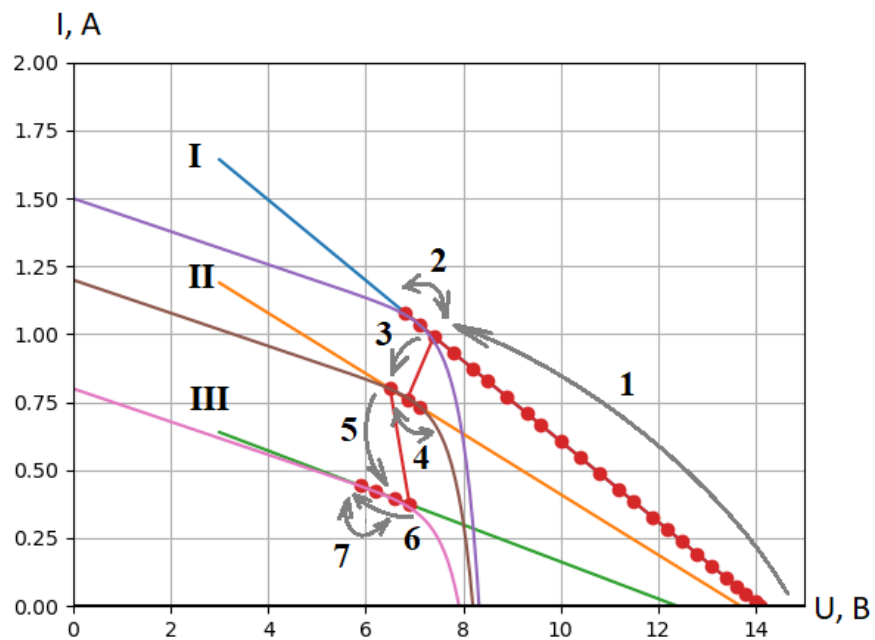


Рис. 5.11

Відповідно до алгоритму, напруга та струм поступово наближаються до точки максимальної потужності, напрямок позначено стрілкою 1; перейшовши цю точку, контролер постійно збільшує чи зменшує значення коефіцієнту заповнення DC-DC перетворювача (стрілка 2), таким чином знаходячись у околі шуканої точки та віддаляючись від неї на один крок; після переходу у режим навантажувальних прямої II за допомогою перемикання напруги та зміни опору, тобто емулюючи зменшення освітленості, робоча точка різко зміщується (стрілка 3), при цьому потужність зменшується тому контролер змінює напрям зміни коефіцієнту заповнення, після чого повторюється пошук точки та коливання біля її околу (стрілка 4), цей процес повторюється і при переході на пряму III (стрілки 5-7).

Наступним етапом для перевірки роботи системи буде підключення її до Wi-Fi модуля з контролером ESP8266.

Розроблений програмний код на основі розглянутого алгоритму був завантажений до Wi-Fi модуля. Після завантаження модуль підключається зазначеними виводами до MPPT контролера, а також підключаються виводи живлення.

У програмному коді зокрема вказується режим безпроводної роботи, у даному випадку – підключення до існуючої безпроводної мережі, а також назва та код доступу відповідної мережі. Після підключення до мережі, за допомогою налаштування маршрутизатора, можна визначити IP адресу ESP8266. В даному випадку адресою являється 192.168.0.108, перейшовши на яку можна спостерігати HTML сторінку зображену на рис. 5.12.

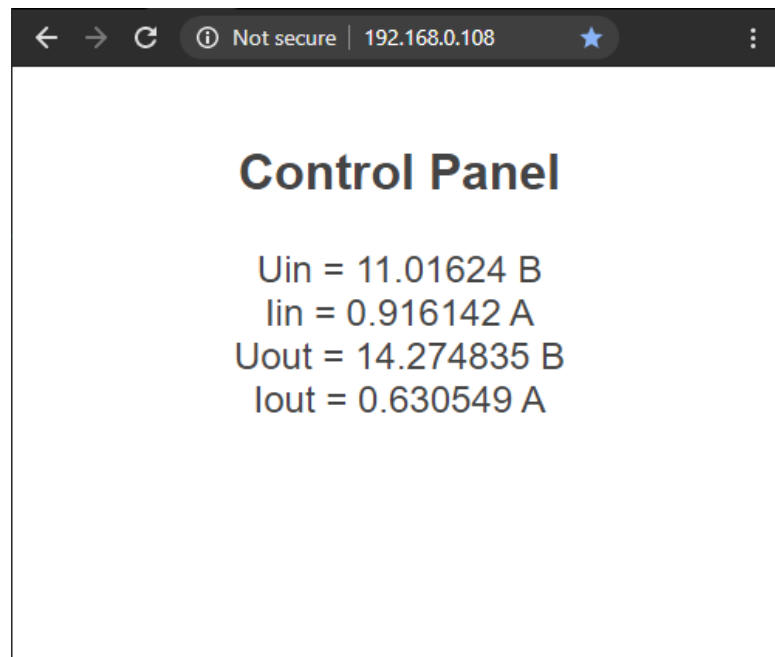


Рис. 5.12

Відповідно до алгоритму після HTTP запиту від користувача відбувається I2C запит до MPPT контролеру та після закінчення відправки розраховуються значення та формується HTML сторінка, що відправляється HTTP відповіддю. На сторінці відображається інформація з датчиків MPPT контролера, що знаходяться на виводах сонячної батареї та акумуляторі, показуючи значення струму та напруги в момент завантаження сторінки.

## Висновки до розділу 5

1. Розглянуто методику розробки друкованої плати та наведені зображення різних етапів розробки.



2. Розглянуті часові діаграми для моменту переходу режимів роботи перетворювача.
3. Наведені осцилограми керуючих сигналів для транзисторів.
4. Проілюстровано реакцію алгоритму у момент зміни зовнішніх параметрів.
5. Проведено тестування безпроводної роботи системи та наведено зображення сторінки з відображеними робочими параметрами.

## **6. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ**

Стартап як форма малого ризикового (венчурного) підприємництва впродовж останнього десятиліття набула широкого розповсюдження у світі через зниження бар'єрів входу в ринок (із появою Інтернету як інструменту комунікацій та збуту стало простіше знаходити споживачів та інвесторів, займатись пошуком ресурсів, перетинати кордони між ринками різних країн), і вважається однією із наріжних складових інноваційної економіки, оскільки за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап-проектів загальна маса інноваційних ідей зростає.

Проте створення та ринкове впровадження стартап-проектів відзначається підвищеною мірою ризику, ринково успішними стає лише невелика частка, що за різними оцінками складає від 10% до 20%. Ідея стартап-проекту, взята окремо, не вартує майже нічого: головним завданням керівника проекту на початковому етапі його існування є перетворення ідеї проекту у працюючу бізнес-модель, що починається із формування концепції товару (послуги) для визначеної клієнтської групи за наявних ринкових умов.

### **Етапи розроблення стартап-проекту.**

#### **1. Маркетинговий аналіз стартап-проекту**

В межах цього етапу:

- розробляється опис самої ідеї проекту та визначаються загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів;
- аналізуються ринкові можливості щодо його реалізації;
- на базі аналізу ринкового середовища розробляється стратегія ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту.

#### **2. Організація стартап-проекту**

В межах цього етапу:

- складається календарний план-графік реалізації стартап-проекту;

- розраховується потреба в основних засобах та нематеріальних активах;
- визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, на основі чого формуються потреба у матеріальних ресурсах та персоналі;
- розраховуються загальні початкові витрати на запуск проекту та планові загальногосподарські витрати, необхідні для реалізації проекту.

### 3. Фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту

В межах цього етапу:

- визначається обсяг інвестиційних витрат;
- розраховуються основні фінансово-економічні показники проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту);
- визначається рівень ризикованості проекту, визначаються основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики).

### 4. Заходи з комерціалізації проекту

Цей етап спрямовано на пошук інвесторів та просування інвестиційної пропозиції (оферти). Він передбачає:

- визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів;
- складання інвест-пропозиції (оферти): стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом;
- планування заходів з просування оферти: визначення комунікаційних каналів та площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів;
- планування ресурсів для реалізації заходів з просування оферти.

Означені етапи, реалізовані послідовно та вчасно – створюють передумови для успішного ринкового старту.

## 6.1 Опис ідеї проекту

Опис ідеї стартап-проекту наведено в табл. 6.1, визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту в табл. 6.2.

Таблиця 6.1.

Опис ідеї стартап - проекту		
Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка та побудова контролеру знаходження точки максимальної потужності сонячної батареї з використанням безпроводних технологій	Енергетична галузь	Можливість більш гнучкого налаштування режимів роботи
	Побутова електроніка	Зручність використання, налаштування та моніторингу роботи

Таблиця 6.2.

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту							
Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W	N	S
	Мій проект	Конкурент					
		1	2	3			
Використання методу знаходження ТМП	так	ні	так	так			+
Можливість використання різних методів знаходження ТМП	так	ні	ні	ні		=	
Використання безпроводних технологій	так	ні	ні	ні			+

## 6.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Технологічна здійсненність ідеї проекту наведено в табл. 6.3.

Таблиця 6.3.

Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Створення та дослідження МРРТ контролера та дослідження методів пошуку ТМП та використанню безпроводних технологій	Дослідження; розробка; програмування	Наявна	Доступна

### 6.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Попередню характеристика потенційного ринку стартап проекту наведено в табл. 6.4.

Таблиця 6.4.

Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Кількість головних гравців, од	10
Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1500
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Поступово зростає
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутність масового виробника
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ІРхх
Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	80

Характеристика потенційних клієнтів наведена в табл.6.5.

Фактори загроз, їх зміст та можлива реакція компанії наведено в табл.6.6.

В табл. 6.7 наведено фактори можливостей, їх зміст та можливу реакцію компанії.

Таблиця 6.5.

## Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<b>Потреба, що формує ринок</b>	<b>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</b>	<b>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</b>	<b>Вимоги споживачів до товару</b>
Швидкий розвиток відновлюваної енергетики, що потребує ефективних рішень у сфері перетворення напруг та взаємодії з користувачем	Компанії, що займаються реалізацією сонячних батарей; Кінцеві користувачі зацікавлені у використанні безпроводних рішень	Експлуатація в різних умовах; відмінності у платформах, що використовуватимуться для безпроводного зв'язку	- до продукції: Ефективність Надійність Функціональність - до компанії-постачальника: Професіоналізм Чесність Технічна підтримка

Таблиця 6.6.

## Фактори загроз

<b>Фактор</b>	<b>Зміст загрози</b>	<b>Можлива реакція компанії</b>
Конкуренція	Можливість появи нових гравців на ринку, продукція яких буде кращою за ту ж вартість	Постійний аналіз ринку для постійної модифікації та удосконалення
Збої у роботі ПЗ	Через використання комплексної системи цифрових модулів та зв'язку з інтернетом	Необхідна обережна розробка, тестування та підтримка ПЗ
Вразливості ПЗ	Можливість дистанційного втручання шахраями у роботу пристрою через використання інтернету	Дослідження та усунення більшості можливих вразливостей

Таблиця 6.7.

## Фактори можливостей

<b>Фактор</b>	<b>Зміст можливості</b>	<b>Можлива реакція компанії</b>
Простий та зрозумілий безпроводний зв'язок з користувачем	Наявність безпроводного зв'язку у комбінації з широким функціоналом налаштувань	Залучення нових клієнтів за допомогою маркетингу

В табл. 6.8 наведено результати ступеневого аналізу конкуренції на ринку.

Після цього в табл.6.9 наведені фактори конкурентоспроможності та обґрунтування їх значущості.

В табл.6.10 наведено SWOT аналіз слабких, сильних сторін стартап-проекту а також можливості та загрози.

Таблиця 6.8.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: чиста	В кого краще - в того купують	Покращення якості товару
2. За рівнем конкурентної боротьби: світова	Належить до вузького ринку збуту;	Розширення функціоналу та орієнтації користувачів
3. За галузевою ознакою: внутрішньогалузева	Притаманна лише в середині однієї галузі застосування	Розширення функціоналу та галузей застосування
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Відрізняється функціональністю	Покращення ефективності перетворювача
5. За характером конкурентних переваг: цінова та нецінова	Чим дешевше – тим привабливіше; Чим краще – тим рентабельніше;	Покращення цінової політики та якості товару
6. За інтенсивністю: не марочна	Не жорстка конкуренція	Не агресивні форми піару

Таблиця 6.9.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
Ціна	Серед схожих по характеристикам систем обирають ту, яка дешевше
Якість	Серед схожих по ціні систем обирають ту, яка має кращі характеристики
Функціонал	Серед схожих по функціоналу систем обирають ту, яка має більше функцій

Таблиця 6.10.

## SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Можливість безпроводного керування та моніторингу Можливість вибору методу пошуку ТМП	Слабкі сторони: Складність реалізації алгоритму систем керування
Можливості: Можливості розвитку програмного забезпечення Можливість покращення алгоритму пошуку ТМП	Загрози: Поява конкурентів зі схожим функціоналом Можливість шахрайських атак через мережу Інтернет

**6.4. Розробка ринкової стратегії стартап-проекту**

Для розроблення маркетингової програми стартап-проекту перш за все необхідно визначити базову стратегію конкурентної поведінки. Результати наведені в табл. 6.11.

Таблиця 6.11.

## Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
З точки зору принципів побудови – ні З точки зору використання безпроводних технологій у сфері МРРТ-контролерів – так	Забирати існуючих у конкурентів	Так – загальні принципи побудови топології силової частини	Стратегія заняття конкурентної ніші

В табл. 6.12 наведено визначення ключових переваг концепції потенційного товару, тобто, вигоду, яку пропонує дана система для споживачів.

В табл.6.13 наведено рівень цін на товари замітники та аналоги, а також верхня та нижня межа ціни на систему.



Таблиця 6.12.

## Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
Підвищення функціоналу та зручності користування	Функціональність та зручність	Використання безпроводних технологій
Підвищення якості вихідної напруги систем з альтернативними джерелами енергії	Ефективність та конкурентоспроможність	Застосування різних алгоритмів пошуку ТМП; Технічна підтримка

Таблиця 6.13.

## Визначення меж встановлення ціни

<i>Рівень цін на товари-замінники</i>	<i>Рівень цін на товари-аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
Немає	1000/5000 грн	Немає	2000/5000 грн

Формування системи збуту наведено в табл.6.14.

Таблиця 6.14.

## Формування системи збуту

<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
Роздрібна та оптова закупівля продукту	Збут та налаштування товару	Усі можливі канали збуту (глибока)	Залучена

В результаті проведеного маркетингового аналізу перспектив реалізації запропонованих науково-технічних рішень та пропозицій, оцінювання можливостей їх ринкового впровадження можна стверджувати, що розроблений перетворювач має можливість ринкової комерціалізації та може бути рентабельним проектом на ринку. Зростання попиту на аналогічні товари додає масовості придбання подібних товарів, але створює жорсткі конкурентні умови виходу на ринок.

Проект має високі перспективи впровадження з огляду на сучасний стан ринку, що потребує більш ефективних рішень. Перешкодами входження

на ринок може бути сильний конкурентний тиск з боку великих фірм, які займаються розробкою подібних МРРТ контролерів, а також потреба у великій кількості кваліфікованих кадрів та дорогої апаратури. Але якщо правильно розставити пріоритети і зарекомендувати себе на ринку, проект має великі шанси на прибуток. Подальша імплементація проекту є доцільною та рентабельною.

### **Висновки до розділу 6**

1. Визначено зміст ідеї, напрямки застосування та вигоду для користувача.
2. Визначені сильні, слабкі та нейтральні характеристики ідеї проекту
3. Оцінено технологічну здійсненність ідеї проекту.
4. Проведено попередню оцінку характеристики потенційного ранку стартап-проекту.
5. Проведена характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту.
6. Оцінено фактори загроз та фактори можливостей.
7. Проведено ступеневий аналіз конкуренції на ринку.
8. Обґрунтовано фактори конкурентоспроможності.
9. Визначено базову стратегію розвитку та ключові переваги концепції потенційного товару.
10. Оцінено межі встановлення цін.

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Таким чином, у даному дипломному проекті було розроблено контролер знаходження точки максимальної потужності сонячної батареї. Зокрема, під час розробки також було виконано:

1. Огляд методу пошуку ТМП. Зокрема розглянуто теоретичну частину пов'язану з роботою сонячної батареї, складові частини та конфігурація установок сонячних батарей. Показані проблеми, для вирішення яких, використовують MPPT контролери. На основі розглянутої науково-технічної літератури визначені алгоритми слідування за ТМП та проаналізовані їх особливості переваги та недоліки.

2. Проаналізовані основні схеми для використання у силовій частині та розглянуті їх особливості. Виходячи з огляду та завдань роботи було вибрано схему 2-Switch Buck-Boost перетворювача.

3. На основі теоретичних відомостей було розроблено структурну схему, визначивши набір складових частин системи та описавши їх зв'язок та взаємодію під час роботи.

4. Розрахунок та вибір елементів схеми, зокрема остаточно визначивши усі схемотехнічні рішення, що застосовуватимуться. На основі цього було розроблено електричну принципову схему системи.

5. Побудова друкованої плати. Зокрема побудувавши у вибраному програмному забезпеченні усі зв'язки між елементами схеми було виконане їх розміщення та трасування, розмічена межа плати та визначені її розміри. На основі цього була виконана побудова друкованої плати на склотекстоліті потрібного розміру.

6. Розробка та опис ПЗ, зокрема приведені алгоритми роботи мікроконтролерів та методу пошуку ТМП. Визначені виводи які програмувалися у ПЗ та описана структура побудови програмного коду та набір інструментів та стандартних бібліотек.

7. Тестування роботи виконаної системи. Обрахувавши та отримавши всі потрібні елементи системи було виконане їх повне з'єднання виводів та прошивка мікроконтролерів розробленим ПЗ. Після чого були проведені перевірки справності системи за певних умов роботи продемонструвавши сигнали певних ділянок системи, а також можливість безпроводного зв'язку зі системою за допомогою Wi-Fi. Протестовано його роботу та проемуювано можливості реакції на зміну освітленості, що показало працездатність системи у межах завдання та відкриває перспективи вдосконалення, а також реального випробування системи, використовуючи різні СБ та споживачі при різних погодних умовах.

Розроблена система відрізняється простотою, модульністю та гнучкістю налаштування, а також, за рахунок вибраного DC-DC перетворювача, можливістю роботи у понижуючому і підвищуючому режимах та потенційним використанням декількох методів знаходження ТМП. А отже система має переваги у використанні та дослідженні різних вхідних та вихідних пристроїв, а також модифікації системи керування, для дослідження чи доповнення функціоналу системи.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Advances in Renewable Energies and Power Technologies. Volume 1: Solar and Wind Energies / Edited by Imene Yahyaoui, University Carlos III of Madrid, Spain // Elsevier Science, 2018. - 530 с. - ISBN 978-0-12-812959-3
2. Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems / Edited by Ali M. Eltamaly, Almoataz Y. Abdelaziz // Springer. - 2020. - 486 с. - ISBN 978-3-030-05578-3 DOI: 10.1007/978-3-030-05578-3
3. Giovanni Petrone, Carlos Andres Ramos-Paja, Giovanni Spagnuolo. Photovoltaic Sources Modeling // Wiley. - 2017. - 186 с. - ISBN: 9781118679036
4. Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications / Edited by Agustin Mcevoy, Tom Marvart, Luis Castaner // Academic Press. - 2012. - ISBN 978-0-12-385934-1
5. Nicola Pearsall. The Performance of Photovoltaic PV Systems // Elsevier S & T. - ISBN: 978-1-78242-354-6
6. Jenny Nelson. The Physics of Solar Cells // Imperial College Press. - ISBN: 1-86094-349-7
7. Wikipedia Contributors. Maximum power point tracking / Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2020 [Електронний ресурс]. URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Maximum\\_power\\_point\\_tracking&oldid=943845013](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Maximum_power_point_tracking&oldid=943845013).
8. Weidong Xiao. Photovoltaic Power System: Modeling, Design, and Control // John Wiley & Sons Ltd., 2017. - ISBN: 1119280346.
9. D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez. PV panel model based on datasheet values // in 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, - 2007, pp. 2392–2396. - DOI: 10.1109/ISIE.2007.4374981.
10. J.-M. Kwon, K.-H. Nam, and B.-H. Kwon. Photovoltaic Power Conditioning System With Line Connection // IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 4, pp. 1048–1054, Jun. 2006. - DOI: 10.1109/TIE.2006.878329.

11. R. Faranda and S. Leva. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems // WSEAS Trans. Power Syst., vol. 3, no. 6, pp. 446–455, 2008, URL: <http://www.wseas.us/e-library/transactions/power/2008/27-545.pdf>.
12. B. K. Bose, P. M. Szczesny, and R. L. Steigerwald. Microcomputer Control of a Residential Photovoltaic Power Conditioning System // IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-21, no. 5, pp. 1182–1191, Sep. 1985, DOI: 10.1109/TIA.1985.349522.
13. Haifeng Fan. Design tips for an efficient non-inverting buck-boost converter // TI Analog Appl. J., vol. 3Q, pp. 20–25, 2014, URL: <http://www.ti.com/lit/an/slyt584/slyt584.pdf>.
14. M. A. G. de Brito, L. Galotto, L. P. Sampaio, G. de A. e Melo, and C. A. Canesin. Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications // IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 3, pp. 1156–1167, Mar. 2013, DOI: 10.1109/TIE.2012.2198036.
15. Wikipedia Contributors. Theory of solar cells / Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2020 [Электронный ресурс]. URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Theory\\_of\\_solar\\_cells&oldid=944258832](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Theory_of_solar_cells&oldid=944258832)
16. Wikipedia Contributors. Buck converter / Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2020 [Электронный ресурс]. URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Buck\\_converter&oldid=970174022](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Buck_converter&oldid=970174022)
17. Wikipedia Contributors. Boost converter / Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2020 [Электронный ресурс]. URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Boost\\_converter&oldid=978980616](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Boost_converter&oldid=978980616)
18. Wikipedia Contributors. Buck–boost converter / Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2020 [Электронный ресурс]. URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Buck%E2%80%93boost\\_converter&oldid=979572938](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Buck%E2%80%93boost_converter&oldid=979572938)
19. Wikipedia Contributors. Single-ended primary-inductor converter / Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2020 [Электронный ресурс]. URL:

[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Single-ended\\_primary-inductor\\_converter&oldid=979470791](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Single-ended_primary-inductor_converter&oldid=979470791)

20. Jeff Falin. Designing DC/DC converters based on ZETA topology // Analog Applications Journal, High-Performance Analog Products. URL: <https://www.ti.com/lit/an/slyt372/slyt372.pdf>

21. MOHOO 20A 12V-24V Solar Charge Controller User Manual. URL: <https://www.mohoo.company/downfile.html?path=/mohoo/20171115/5a0bfa446500d-MOHOO%2020A%2012V-24V%20Solar%20Charge%20Controller%20User%20Manual.pdf>

22. Technical specifications of The Traveler Series TM : Wanderer. URL: <https://www.renogy.com/template/files/Manuals/Wanderer%20Li%20%281%29.pdf>

23. Technical specifications of FLEXmax 60/80. URL: [https://www.outbackpower.com/downloads/documents/charge\\_controllers/flexmax\\_6080/specsheet.pdf](https://www.outbackpower.com/downloads/documents/charge_controllers/flexmax_6080/specsheet.pdf)

24. Technical specifications of Tracer-AN series. URL: <https://www.epsolarpv.com/upload/cert/file/1811/EPEVER-Datasheet-Tracer-AN%EF%BC%8810-40A%EF%BC%89.pdf>

25. Y. Wenbo, W. Quanyu, and G. Zhenwei. Smart home implementation based on Internet and WiFi technology // in 2015 34th Chinese Control Conference (CCC), 2015, pp. 9072–9077, DOI: 10.1109/ChiCC.2015.7261075.

26. Документація для STM32F103C8. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html>

27. Документація для bluepill. URL: <https://stm32-base.org/boards/STM32F103C8T6-Blue-Pill.html>

28. Документація для INA169. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina169.pdf?ts=1599147082968>

29. Документація для LM2596. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>

30. Michael Green. Design Calculations for Buck-Boost Converters. URL: <https://www.ti.com/lit/an/slva535a/slva535a.pdf>
31. Документація для IRF7341. URL: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/12v-300v-n-channel-power-mosfet/irf7341/>
32. Документація для EFH471M50B. URL: [https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/efh\\_hitano-datasheet.pdf](https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/efh_hitano-datasheet.pdf)
33. Документація для драйвера 1EDI20I12MF. URL: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-1EDIX0I12MF-DS-v02\\_00-EN.pdf?fileId=5546d46145f1f3a401462944e0190fd7](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-1EDIX0I12MF-DS-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d46145f1f3a401462944e0190fd7)
34. Документація для OLED модуль SSD1306. URL: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>
35. Datasheet ESP-12E WiFi Module. URL: [https://components101.com/sites/default/files/component\\_datasheet/ESP12E%20Ddatasheet.pdf](https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/ESP12E%20Ddatasheet.pdf)
36. CoCoX CoIDE, a free and highly-integrated software development environment for ARM Cortex MCUs [Електронний ресурс] . URL: <https://www.st.com/en/development-tools/coide.html>
37. CMSIS [Електронний ресурс]. URL: <https://developer.arm.com/tools-and-software/embedded/cmsis>
38. STM32F10x standard peripheral library [Електронний ресурс]. URL: [https://www.st.com/content/st\\_com/en/products/embedded-software/mcu-mpu-embedded-software/stm32-embedded-software/stm32-standard-peripheral-libraries/stsw-stm32054.html](https://www.st.com/content/st_com/en/products/embedded-software/mcu-mpu-embedded-software/stm32-embedded-software/stm32-standard-peripheral-libraries/stsw-stm32054.html)
39. NodeMCU Firmware Github Repository [Електронний ресурс]. URL: <https://github.com/nodemcu/nodemcu-firmware>
40. Arduino Software [Електронний ресурс]. URL: <https://www.arduino.cc/en/software>
41. Micropython [Електронний ресурс]. URL: <https://micropython.org/>



42. WebREPL client for MicroPython Github Repository [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/micropython/webrepl>
43. MDN Web Docs [Электронный ресурс]. - HTTP. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP>
44. HTML Living Standard [Электронный ресурс]. URL: <https://html.spec.whatwg.org/>
45. MDN Web Docs [Электронный ресурс]. - GET. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/Methods/GET>
46. DipTrace [Электронный ресурс]. URL: <https://diptrace.com/>

## ДОДАТОК 1. Лістинг програмного забезпечення

Файл main.c:

```
#include "defines.h"
#include "IOs.h"
#include "timers.h"
#include "ADC.h"
#include "ssd1306.h"

void Init_Peripherals(void);
void Calculate_Analog(void);
void Out_Int(int16_t value, uint8_t dec, uint16_t x, uint16_t y,
uint8_t places);

int main(void) {
    Init_Peripherals();
    GPIO_SetBits(GPIOC, GPIO_Pin_13);
    SSD1306_Init();
    SSD1306_GotoXY(0, 22);
    SSD1306_Puts("I", &Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);
    SSD1306_GotoXY(0, 44);
    SSD1306_Puts("O", &Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);
    SSD1306_UpdateScreen();
    TIM1->CCR2 = 0; // buck FET
    TIM1->CCR1 = 0; // boost FET
    while(1) {
        Calculate_Analog();
        if (out_to_screen) {
            Out_Int((int16_t)Analog.Vpv,1,18,22,4);
            SSD1306_Puts("V", &Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);
            Out_Int((int16_t)Analog.Ipv,1,81,22,3);
            SSD1306_Puts("A", &Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);
            Out_Int((int16_t)Analog.Vbat,1,18,44,4);
            SSD1306_Puts("V", &Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);
            Out_Int((int16_t)Analog.Ibat,1,81,44,3);
            SSD1306_Puts("A", &Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);
            Out_Int((int16_t)PWM_buck,0,0,0,3);
            Out_Int((int16_t)PWM_boost,0,30,0,3);
            Out_Int((int16_t)power_value,1,70,0,5);
            if (cursor_drawn) {
                SSD1306_DrawLine(128,43,128,60, SSD1306_COLOR_BLACK);
                cursor_drawn = 0;
            } else {
                SSD1306_DrawLine(128,43,128,60, SSD1306_COLOR_WHITE);
            }
        }
    }
}
```

```

        cursor_drawn = 1;
    }
    SSD1306_UpdateScreen();
    out_to_screen = 0;
}
}
}

void Init_Peripherals(void) {
    IOs_Init();
    Timer2App_Init();
    Timer3Analog_Init();
    Timer1PWM_Init();
    ADC_DMA_Init();
}

void Calculate_Analog(void) {
    Analog.Vpv = ADCFiltered.AIN4*337/4095;
    Analog.Vbat = ADCFiltered.AIN6*332/4095;
    Analog.Ipv = ADCFiltered.AIN5*33.3/4095;
    Analog.Ibat = ADCFiltered.AIN7*33/4095;
}

void Out_Int(int16_t value, uint8_t dec, uint16_t x, uint16_t y,
uint8_t places) {
    uint8_t negative = 0;
    uint8_t addzeroes = 0;
    uint16_t tempval = 0;
    uint8_t digits = 0;
    uint8_t places_redrawn = 0;

    if (places > 7) places = 7;
    if (dec > 3) dec = 3;
    if (value < 0) negative = 1;

    tempval = abs(value);
    if (tempval>9999) digits = 5;
    else if (tempval>999) digits = 4;
    else if (tempval>99) digits = 3;
    else if (tempval>9) digits = 2;
    else digits = 1;

    if (dec) places_redrawn = digits + 1;
    else places_redrawn = digits;
    if (negative) places_redrawn++;
    if (dec >= digits) {

```

```

    addzeroes = dec - digits + 1;
    places_redrawn += addzeroes;
}

SSD1306_GotoXY(x, y); // GOTO(Horz,Vert)
int i;
for (i = 0; i < (places-places_redrawn); ++i) {
    SSD1306_Puts(" ", &Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);
}
if (negative) SSD1306_Puts("-", &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE);
if (addzeroes) {
    SSD1306_Puts("0,", &Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);
    for (i = 1; i < addzeroes; ++i) {
        SSD1306_Puts("0", &Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);
    }
}
switch (digits) {
    case 2:
        if (dec) {
            SSD1306_Putc(48+(tempval/10), &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE); // write 1st char
            SSD1306_Puts(",", &Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);
// write comma
            SSD1306_Putc(48+(tempval%10), &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE); // write 2nd char
        } else {
            SSD1306_Putc(48+(tempval/10), &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE); // write 1st char
            SSD1306_Putc(48+(tempval%10), &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE); // write 2nd char
        }
        break;
    case 3:
        SSD1306_Putc(48+(tempval/100), &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE); // write 1st char
        if (dec) {
            switch (dec) {
                case 1: // if dec=1
                    SSD1306_Putc(48+((tempval%100)/10), &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE); // write 2nd char
                    SSD1306_Puts(",", &Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);
// write comma
                    break;
                default: // if dec=2

```

```

        SSD1306_Puts(",", &Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);
// write comma
        SSD1306_Putc(48+((tempval%100)/10), &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE); // write 2nd char
        break;
    }
    } else {
        SSD1306_Putc(48+((tempval%100)/10), &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE); // write 2nd char
    }
    SSD1306_Putc(48+((tempval%100)%10), &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE); // write 3rd char
    break;
    case 4:
        SSD1306_Putc(48+(tempval/1000), &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE); // write 1st char
        if (dec) {
            switch (dec) {
                case 1: // if dec=1
                    SSD1306_Putc(48+((tempval%1000)/100), &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE); // write 2nd char
                    SSD1306_Putc(48+(((tempval%1000)%100)/10),
&Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE); // write 3rd char
                    SSD1306_Puts(",", &Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);
// write comma
                    break;
                case 2: // if dec=2
                    SSD1306_Putc(48+((tempval%1000)/100), &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE); // write 2nd char
                    SSD1306_Puts(",", &Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);
// write comma
                    SSD1306_Putc(48+(((tempval%1000)%100)/10),
&Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE); // write 3rd char
                    break;
                default: // if dec=3
                    SSD1306_Puts(",", &Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);
// write comma
                    SSD1306_Putc(48+((tempval%1000)/100), &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE); // write 2nd char
                    SSD1306_Putc(48+(((tempval%1000)%100)/10),
&Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE); // write 3rd char
                    break;
            }
        } else {
            SSD1306_Putc(48+((tempval%1000)/100), &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE); // write 2nd char

```

```

        SSD1306_Putc(48+(((tempval%1000)%100)/10),    &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE);    // write 3rd char
    }
    SSD1306_Putc(48+(((tempval%1000)%100)%10),    &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE);    // write 4th char
    break;
case 5:
    SSD1306_Putc(48+(tempval/10000),    &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE);    // write 1st char
    SSD1306_Putc(48+(((tempval%10000)/1000),    &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE);    // write 2nd char
    if (dec) {
        switch (dec) {
            case 1:    // if dec=1
                SSD1306_Putc(48+(((tempval%10000)%1000)/100),
&Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);    // write 3rd char
                SSD1306_Putc(48+(((tempval%10000)%1000)%100)/10),
&Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);    // write 4th char
                SSD1306_Puts(",",    &Font_11x18,    SSD1306_COLOR_WHITE);
// write comma
                break;
            case 2:    // if dec=2
                SSD1306_Putc(48+(((tempval%10000)%1000)/100),
&Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);    // write 3rd char
                SSD1306_Puts(",",    &Font_11x18,    SSD1306_COLOR_WHITE);
// write comma
                SSD1306_Putc(48+(((tempval%10000)%1000)%100)/10),
&Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);    // write 4th char
                break;
            default:    // if dec=3
                SSD1306_Puts(",",    &Font_11x18,    SSD1306_COLOR_WHITE);
// write comma
                SSD1306_Putc(48+(((tempval%10000)%1000)/100),
&Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);    // write 3rd char
                SSD1306_Putc(48+(((tempval%10000)%1000)%100)/10),
&Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);    // write 4th char
                break;
        }
    } else {
        SSD1306_Putc(48+(((tempval%10000)%1000)/100),
&Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);    // write 3rd char
        SSD1306_Putc(48+(((tempval%10000)%1000)%100)/10),
&Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);    // write 4th char
    }
    SSD1306_Putc(48+(((tempval%10000)%1000)%100)%10),
&Font_11x18, SSD1306_COLOR_WHITE);    // write 5th char

```

```

        break;
    default:
        SSD1306_Putc(48+tempval,                                &Font_11x18,
SSD1306_COLOR_WHITE);                                         // write 1st char
        break;
    }
}

```

### Файл ADC.c:

```

#include "ADC.h"

void ADC_DMA_Init(void) {
    GPIO_InitTypeDef      GPIO_InitStructure;
    ADC_InitTypeDef        ADC_InitStructure;
    DMA_InitTypeDef        DMA_InitStructure;

    RCC_AHBPeriphClockCmd(RCC_AHBPeriph_DMA1, ENABLE);
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_ADC1, ENABLE);
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_GPIOA, ENABLE);
    RCC_ADCCLKConfig(RCC_PCLK2_Div6);
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin
GPIO_Pin_4|GPIO_Pin_5|GPIO_Pin_6|GPIO_Pin_7;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AIN;
    GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStructure);

    DMA_DeInit(DMA1_Channel1);
    DMA_InitStructure.DMA_BufferSize = 4;
    DMA_InitStructure.DMA_DIR = DMA_DIR_PeripheralSRC;
    DMA_InitStructure.DMA_M2M = DMA_M2M_Disable;
    DMA_InitStructure.DMA_MemoryBaseAddr = (uint32_t)&ADC_Result;
    DMA_InitStructure.DMA_MemoryDataSize
DMA_MemoryDataSize_HalfWord;
    DMA_InitStructure.DMA_MemoryInc = DMA_MemoryInc_Enable;
    DMA_InitStructure.DMA_Mode = DMA_Mode_Circular;
    DMA_InitStructure.DMA_PeripheralBaseAddr = (uint32_t)&(ADC1-
>DR);
    DMA_InitStructure.DMA_PeripheralDataSize
DMA_PeripheralDataSize_HalfWord;
    DMA_InitStructure.DMA_PeripheralInc
DMA_PeripheralInc_Disable;
    DMA_InitStructure.DMA_Priority = DMA_Priority_High;
    DMA_Init(DMA1_Channel1, &DMA_InitStructure);
    DMA_Cmd(DMA1_Channel1, ENABLE); // enable channel 1 of DMA1

    ADC_StructInit(&ADC_InitStructure);
}

```

```

    ADC_InitStructure.ADC_ContinuousConvMode = ENABLE;
    ADC_InitStructure.ADC_DataAlign = ADC_DataAlign_Right;
    ADC_InitStructure.ADC_ExternalTrigConv =
ADC_ExternalTrigConv_None;
    ADC_InitStructure.ADC_Mode = ADC_Mode_Independent;
    ADC_InitStructure.ADC_NbrOfChannel = 4;
    ADC_InitStructure.ADC_ScanConvMode = ENABLE;
    ADC_Init(ADC1, &ADC_InitStructure);
    ADC-RegularChannelConfig(ADC1, ADC_Channel_4, 1,
ADC_SampleTime_28Cycles5);
    ADC-RegularChannelConfig(ADC1, ADC_Channel_5, 2,
ADC_SampleTime_28Cycles5);
    ADC-RegularChannelConfig(ADC1, ADC_Channel_6, 3,
ADC_SampleTime_28Cycles5);
    ADC-RegularChannelConfig(ADC1, ADC_Channel_7, 4,
ADC_SampleTime_28Cycles5);
    ADC_Cmd(ADC1, ENABLE);
    ADC_DMACmd(ADC1, ENABLE);

    // ADC calibration
    ADC_ResetCalibration(ADC1);
    while(ADC_GetResetCalibrationStatus(ADC1));
    ADC_StartCalibration(ADC1);
    while(ADC_GetCalibrationStatus(ADC1));
    ADC_SoftwareStartConvCmd(ADC1, ENABLE) ;
}

void ADC_GetFromBuffer(void) {
    /* ADC reading */
    ADCs.AIN4 = ADC_Result[0]; // Vpv to ADC1_Channel_4
    ADCs.AIN5 = ADC_Result[1]; // Ipv to ADC1_Channel_5
    ADCs.AIN6 = ADC_Result[2]; // Vbat to ADC1_Channel_6
    ADCs.AIN7 = ADC_Result[3]; // Ibat to ADC1_Channel_7
}

```

### Файл globalvar.c:

```

#include "stm32f10x.h"
#include "defines.h"

ains          ADCs = {0,0,0,0};
ains32        ADCFiltered = {0,0,0,0};
analog_values Analog = {0,0,0,0};
uint8_t       out_to_screen = 0;
uint8_t       some_error = 0;
uint8_t       cursor_drawn = 0;

```



```

uint16_t    OLED_counter = 0;
uint8_t     analog_counter = 0;
uint32_t    measure_count = 0;
int32_t     upv_buffer = 0;
int32_t     ipv_buffer = 0;
int32_t     ubat_buffer = 0;
int32_t     ibat_buffer = 0;
int16_t     PWM_val = 0;
int         PWM_boost = 0;
int         PWM_buck = 0;
int32_t     power_value = 0;

```

### Файл IOs.c:

```

#include "IOs.h"

void IOs_Init(void) {
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_GPIOC, ENABLE);
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_13;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_Out_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_2MHz;
    GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStructure);
}

```

### Файл timers.c:

```

#include "timers.h"

int32_t temp_value = 0, p0 = 0, p1 = 0;
const uint32_t measure_period_ms = 200;
int do_go_up = 1;
int mode = 0;
int adc_in_value = 0;
int adc_out_value = 0;

void Timer1PWM_Init(void) {
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
    TIM_TimeBaseInitTypeDef TIMER_InitStructure;
    TIM_OCInitTypeDef TIM_OCInitStructure;

    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_TIM1, ENABLE);           //
    enable clock for TIM1
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_GPIOA, ENABLE);

    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_8 | GPIO_Pin_9;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;
}

```

```

    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF_PP;
    GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStructure);
GPIO config

    TIMER_InitStructure.TIM_CounterMode =
TIM_CounterMode_CenterAligned3;
    TIMER_InitStructure.TIM_Prescaler = 1-1;
36000000 / 1 = 36000000 Hz
    TIMER_InitStructure.TIM_Period = 720;
36000000 / 720 = 50000 Hz
    TIM_TimeBaseInit(TIM1, &TIMER_InitStructure);

    TIM_OCInitStructure.TIM_OCMode = TIM_OCMode_PWM1;
    TIM_OCInitStructure.TIM_OutputState = TIM_OutputState_Enable;
    TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = 0;
PWM duty cycle
    TIM_OCInitStructure.TIM_OCPolarity = TIM_OCPolarity_High;
    TIM_OC1Init(TIM1, &TIM_OCInitStructure);
init TIM1 CH1 (PA8)

    TIM_OCInitStructure.TIM_OCMode = TIM_OCMode_PWM1;
    TIM_OCInitStructure.TIM_OutputState = TIM_OutputState_Enable;
    TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = 0;
PWM duty cycle
    TIM_OCInitStructure.TIM_OCPolarity = TIM_OCPolarity_High;
    TIM_OC2Init(TIM1, &TIM_OCInitStructure);
init TIM1 CH2 (PA9)

    /* AOE should be switched on for all timers with break input,
because outputs are disabled by default. */
    TIM_BDTRInitTypeDef timer_bdtr;
    TIM_BDTRStructInit(&timer_bdtr);
    timer_bdtr.TIM_AutomaticOutput = TIM_AutomaticOutput_Enable;
    TIM_BDTRConfig(TIM1, &timer_bdtr);

    TIM_Cmd(TIM1, ENABLE);
}

void Timer2App_Init(void) {
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_TIM2, ENABLE);
enable clock for TIM2

    NVIC_InitTypeDef NVIC_InitStructure;
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannel = TIM2_IRQn;
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelPreemptionPriority = 0;

```

```

    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelSubPriority = 1;           //
less prior than TIM3_IRQn
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelCmd = ENABLE;
    NVIC_Init(&NVIC_InitStructure);

    TIM_TimeBaseInitTypeDef TIMER_InitStructure;
    TIM_TimeBaseStructInit(&TIMER_InitStructure);
    TIMER_InitStructure.TIM_CounterMode = TIM_CounterMode_Up;
    TIMER_InitStructure.TIM_Prescaler = 360-1;                  //
72000000 / 360 = 200000 Hz
    TIMER_InitStructure.TIM_Period = 200-1;                     //
200000 / 200 = 1000 Hz
    TIM_TimeBaseInit(TIM2, &TIMER_InitStructure);
    TIM_ITConfig(TIM2, TIM_IT_Update, ENABLE);
    TIM_Cmd(TIM2, ENABLE);
}

void Timer3Analog_Init(void) {
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_TIM3, ENABLE);
    NVIC_InitTypeDef NVIC_InitStructure;
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannel = TIM3_IRQn;
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelPreemptionPriority = 0;
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelSubPriority = 0;
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelCmd = ENABLE;
    NVIC_Init(&NVIC_InitStructure);

    TIM_TimeBaseInitTypeDef TIMER_InitStructure;
    TIM_TimeBaseStructInit(&TIMER_InitStructure);
    TIMER_InitStructure.TIM_CounterMode = TIM_CounterMode_Up;
    TIMER_InitStructure.TIM_Prescaler = 90-1;    // 72M/90 = 800000
Hz
    TIMER_InitStructure.TIM_Period = 125-1;    // 800K/125 = 6400
Hz
    TIM_TimeBaseInit(TIM3, &TIMER_InitStructure);
    TIM_ITConfig(TIM3, TIM_IT_Update, ENABLE);
    TIM_Cmd(TIM3, ENABLE);
}

void TIM2_IRQHandler(void) {
    if (TIM_GetITStatus(TIM2, TIM_IT_Update) != RESET) {
        TIM_ClearITPendingBit(TIM2, TIM_IT_Update);
        if (OLED_counter >= OLED_PERIOD) {
            out_to_screen = 1;
            OLED_counter = 0;
        } else OLED_counter++;
    }
}

```

```

measure_count++;
if (measure_period_ms < measure_count){
    measure_count = 0;
    adc_in_value = ADCFiltered.AIN4 * 337 / 4095;
    adc_out_value = ADCFiltered.AIN6 * 332 / 4095;
    if(mode == 0 && 50 < adc_in_value){
        mode = 1;
        do_go_up = 1;
        if(adc_in_value < adc_out_value){
            TIM1->CCR2 = 720;
            TIM1->CCR1 = 50;
        }else{
            TIM1->CCR2 = 600;
            TIM1->CCR1 = 0;
        }
    }
    if(mode == 1){
        if(adc_in_value < 50) {
            mode++;
        }else{
            p1 = adc_in_value * ADCFiltered.AIN5 * 3.33 / 4095;
            if(do_go_up && TIM1->CCR2 >= 720 && TIM1->CCR1 < 540){
                TIM1->CCR2 = 720;
                TIM1->CCR1 += 2;
                if (p1 < p0){
                    do_go_up = 0;
                }
            }else if(do_go_up && TIM1->CCR2 < 720){
                TIM1->CCR1 = 0;
                TIM1->CCR2 += 1;
                if (p1 < p0){
                    do_go_up = 0;
                }
            }else if(!do_go_up && TIM1->CCR2 >= 720){
                TIM1->CCR2 = 720;
                TIM1->CCR1 -= 2;
                if(TIM1->CCR1 < 2){
                    TIM1->CCR1 = 0;
                    TIM1->CCR2 = 719;
                }
                if (p1 < p0){
                    do_go_up = 1;
                }
            }else if(!do_go_up && 10 < TIM1->CCR2 && TIM1->CCR2 <
720){

```

```

        TIM1->CCR1 = 0;
        TIM1->CCR2 -= 1;
        if (p1 < p0){
            do_go_up = 1;
        }
    }
    p0 = p1;
}
}else if(5 < mode){mode = 0;}
}
power_value = p1;
PWM_boost = 10* TIM1->CCR1 /72;
PWM_buck = 10* TIM1->CCR2 /72;
}

void TIM3_IRQHandler(void) {
    if (TIM_GetITStatus(TIM3, TIM_IT_Update) != RESET) {
        TIM_ClearITPendingBit(TIM3, TIM_IT_Update);
        if (analog_counter >= 64) {
            ADCFiltered.AIN4 = upv_buffer >> 6;
            ADCFiltered.AIN5 = ipv_buffer >> 6;
            ADCFiltered.AIN6 = ubat_buffer >> 6;
            ADCFiltered.AIN7 = ibat_buffer >> 6;
            upv_buffer = 0;
            ubat_buffer = 0;
            ipv_buffer = 0;
            ibat_buffer = 0;
            analog_counter = 0;
        } else {
            ADC_GetFromBuffer(); // read analog
            inputs
            upv_buffer += ADCs.AIN4;
            ipv_buffer += ADCs.AIN5;
            ubat_buffer += ADCs.AIN6;
            ibat_buffer += ADCs.AIN7;
            analog_counter++;
        }
    }
}
}
}

```

### Файл ADC.c:

```

#include "i2c2esp.h"

extern volatile uint8_t i2cBuffer[16];
uint8_t i2c_iter = 0;

```

```

unsigned char i2c2_mode=I2C2_MODE_WAITING;

uint8_t get_i2c2_ram(uint8_t adr) {
    if (adr < 16) {
        return i2cBuffer[adr];
    }
    else {
        return (uint8_t) 7;
    }
}

void I2C2_Slave_init(void) {
    GPIO_InitTypeDef  GPIO_InitStructure;
    NVIC_InitTypeDef  NVIC_InitStructure;
    I2C_InitTypeDef  I2C_InitStructure;

    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_I2C2, ENABLE);
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_GPIOB, ENABLE);
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_AFIO, ENABLE);

    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin =  GPIO_Pin_10 | GPIO_Pin_11;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF_OD;
    GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStructure);

    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannel = I2C2_EV_IRQn;
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelPreemptionPriority = 0;
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelSubPriority = 0;
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelCmd = ENABLE;
    NVIC_Init(&NVIC_InitStructure);

    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannel = I2C2_ER_IRQn;
    NVIC_Init(&NVIC_InitStructure);

    I2C_InitStructure.I2C_Mode = I2C_Mode_I2C;
    I2C_InitStructure.I2C_DutyCycle = I2C_DutyCycle_2;
    I2C_InitStructure.I2C_OwnAddress1 = I2CSLAVE_ADDR;
    I2C_InitStructure.I2C_Ack = I2C_Ack_Enable;
    I2C_InitStructure.I2C_AcknowledgedAddress =
I2C_AcknowledgedAddress_7bit;
    I2C_InitStructure.I2C_ClockSpeed = I2C2_CLOCK_FRQ;

    I2C_Cmd(I2C2, ENABLE);
    I2C_Init(I2C2, &I2C_InitStructure);
    I2C_ITConfig(I2C2, I2C_IT_EVT, ENABLE);
    I2C_ITConfig(I2C2, I2C_IT_BUF, ENABLE);

```

```

    I2C_ITConfig(I2C2, I2C_IT_ERR, ENABLE);
}

void I2C2_ClearFlag(void) {
    while((I2C2->SR1 & I2C_SR1_ADDR) == I2C_SR1_ADDR) {
        I2C2->SR1;
        I2C2->SR2;
    }
    while((I2C2->SR1 & I2C_SR1_STOPF) == I2C_SR1_STOPF) {
        I2C2->SR1;
        I2C2->CR1 |= 0x1;
    }
}

void I2C2_EV_IRQHandler(void) {
    uint32_t event;
    uint8_t wert;
    event=I2C_GetLastEvent(I2C2);
    if(event==I2C_EVENT_SLAVE_RECEIVER_ADDRESS_MATCHED) {
        i2c2_mode=I2C2_MODE_SLAVE_ADR_WR;
    }
    else if(event==I2C_EVENT_SLAVE_BYTE_RECEIVED) {
        wert=I2C_ReceiveData(I2C2);
        if(i2c2_mode==I2C2_MODE_SLAVE_ADR_WR) {
            i2c2_mode=I2C2_MODE_ADR_BYTE;
            i2c_iter=wert;
        }
    }
    else if(event==I2C_EVENT_SLAVE_TRANSMITTER_ADDRESS_MATCHED) {
        if(16 < i2c_iter){
            i2c_iter = 0;
        }
        i2c2_mode=I2C2_MODE_SLAVE_ADR_RD;
        wert=get_i2c2_ram(i2c_iter);
        I2C_SendData(I2C2, wert);
        i2c_iter++;
    }
    else if(event==I2C_EVENT_SLAVE_STOP_DETECTED) {
        I2C2_ClearFlag();
        i2c2_mode=I2C2_MODE_WAITING;
    }
}

void I2C2_ER_IRQHandler(void) {
    if (I2C_GetITStatus(I2C2, I2C_IT_AF)) {
        I2C_ClearITPendingBit(I2C2, I2C_IT_AF);
    }
}

```

}



## Код для ESP8266

main.py:

```
import machine, webrepl, time, network, usocket, socket
from machine import I2C, Pin

webrepl.start()

def set_wifi_connection(wifis_arr):
    wlan = network.WLAN(network.STA_IF)
    ssid, password, first = '', '', True
    wlan.active(True)
    scanned = wlan.scan()
    for i in scanned:
        for wifi in wifis_arr:
            if(i[0].decode() == wifi[0]):
                if(first):
                    ssid, password, first = wifi[0], wifi[1],
False
    if(ssid == ''):
        wlan.active(False)
        return False
    else:
        wlan.connect(ssid, password)
        machine.Pin(2, machine.Pin.OUT).off()
        time.sleep(2)
        machine.Pin(2, machine.Pin.OUT).on()
        time.sleep(1)
        return wlan

st = set_wifi_connection([('Name1', '123456'), ('Name2',
'123456')])

i2c=I2C(scl=Pin(5), sda=Pin(4), freq=100000)

print('Scan i2c bus...')
devices = i2c.scan()

if len(devices) == 0:
    print("No i2c device !")
else:
    print('i2c devices found:',len(devices))

for device in devices:
```

```

    print("Decimal address: ", device, " | Hexa address: ",
hex(device))

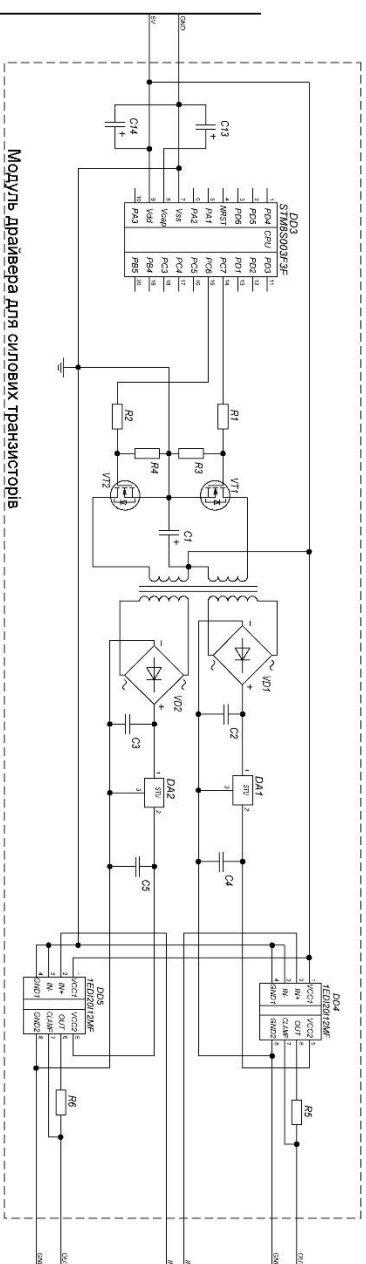
u_in, i_in, u_out, i_out = 0, 0, 0, 0

def web_page():
    try:
        buf = []
        for i in range(16):
            buf.append(int.from_bytes(i2c.readfrom_mem(39, i,
1), "big"))
        print(buf)
        u_in = (buf[1] + (buf[0] << 8)) * 33.7 / 4095
        i_in = (buf[3] + (buf[2] << 8)) * 33.2 / 4095
        u_out = (buf[5] + (buf[4] << 8)) * 3.33 / 4095
        i_out = (buf[7] + (buf[6] << 8)) * 3.3 / 4095
        buf = 'Raw Data: ' + str(buf)
        buf += '<br>Uin = {0}<br> Iin = {1}<br> Uout = {2}<br>
Iout = {3}'.format(u_in, i_in, u_out, i_out)
        print(buf)
    except Exception as e:
        print(e)
        buf = str(i2c.scan()) + '\n' + str(e)
        ptr = "<!DOCTYPE html> <html>\n"
        ptr += "<head><meta name=\"viewport\" content=\"width=device-
width, initial-scale=1.0, user-scalable=no\">\n"
        ptr += "<title>Control MPPT</title>\n"
        ptr += "<style>html { font-family: Helvetica; display:
inline-block; margin: 0px auto; text-align: center;}<\n"
        ptr += "body{margin-top: 50px;} h1 {color: #444444;margin:
50px auto 30px;}<\n"
        ptr += "p {font-size: 24px;color: #444444;margin-bottom:
10px;}<\n"
        ptr += "</style>\n"
        ptr += "</head>\n"
        ptr += "<body>\n"
        ptr += "<div id=\"webpage\">\n"
        ptr += "<h1>Control Panel</h1>\n"
        ptr += "<p>"
        ptr += buf
        ptr += "</p>"
        ptr += "</div>\n"
        ptr += "</body>\n"
        ptr += "</html>\n"
        return ptr

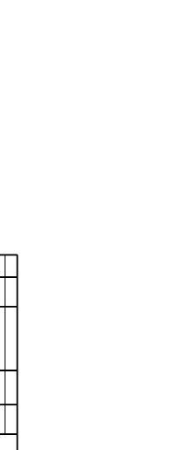
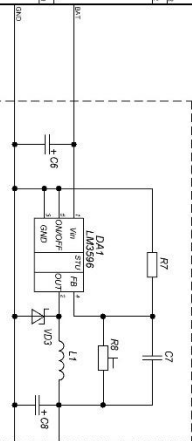
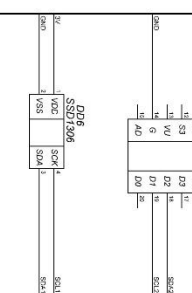
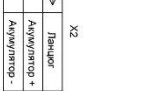
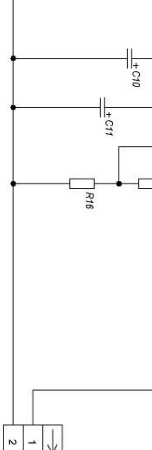
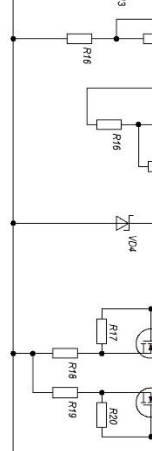
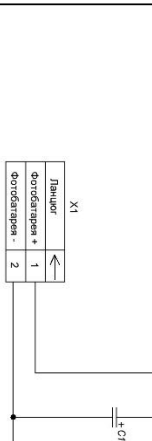
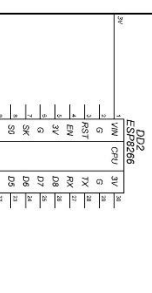
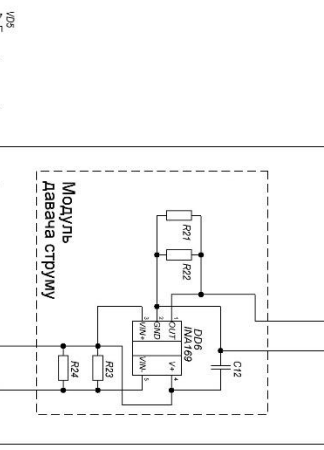
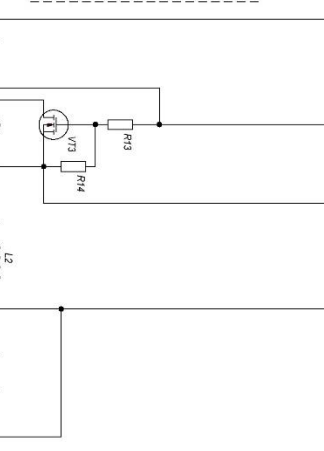
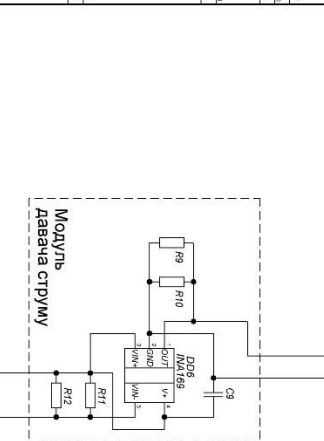
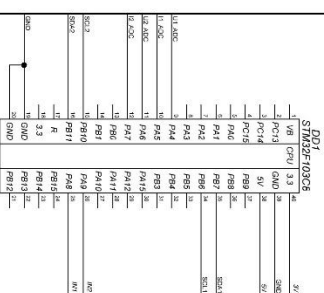
```

```
s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
s.bind(('', 80))
s.listen(5)

while True:
    conn, addr = s.accept()
    print('Got a connection from %s' % str(addr))
    request = conn.recv(1024)
    request = str(request)
    print('Content = %s' % request)
    response = web_page()
    conn.send('HTTP/1.1 200 OK\n')
    conn.send('Content-Type: text/html\n')
    conn.send('Connection: close\n\n')
    conn.sendall(response)
    conn.close()
```

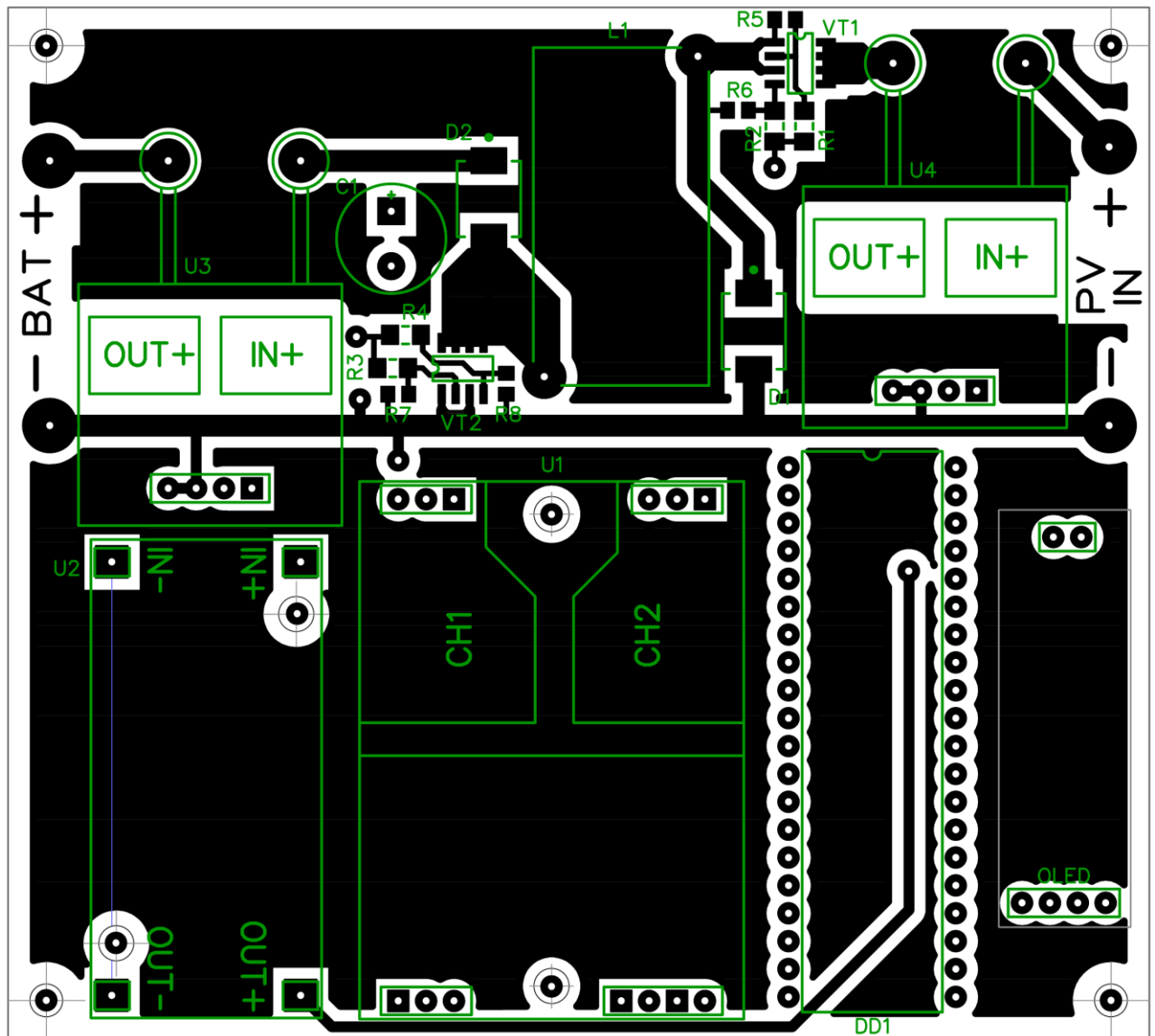


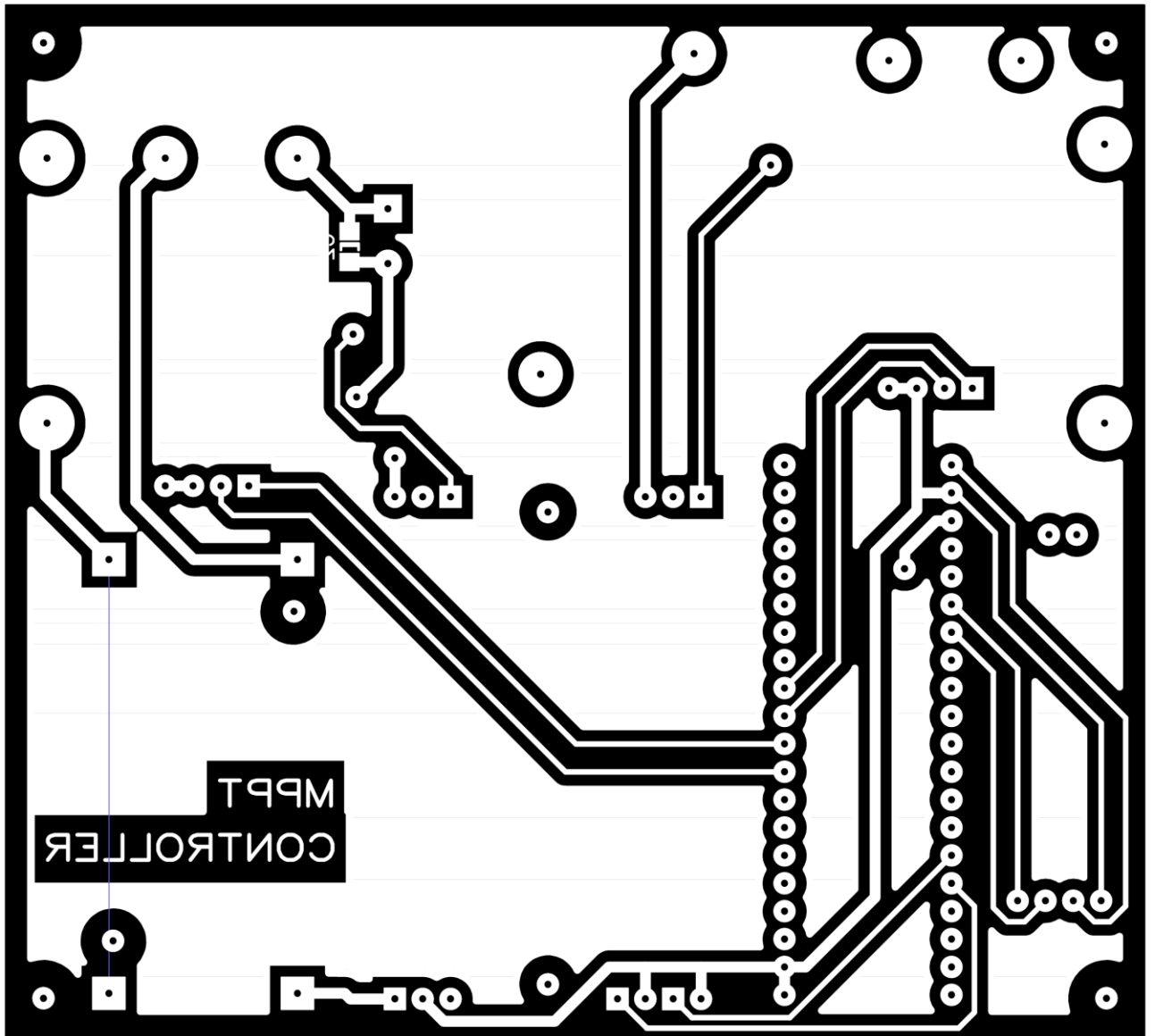
Модуль драйвера для силових транзисторів



ДІС91 000 000 000Е3									
Підприємство для фінансування									
Основа фінансування									
Інформація									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
Звіт									
З									

### ДОДАТОК 3. Креслення друкованої плати





# Тестування контролера знаходження точки максимальної потужності сонячної батареї

**Анотація**— Розглядається проектування та побудова контролера знаходження точки максимальної потужності (ТМП) сонячної батареї та його тестування для різних значень освітленості. Виходячи з можливих схемотехнічних рішень та існуючих програмних алгоритмів роботи контролера знаходження ТМП, була вибрана схема two-switch buck-boost перетворювача та алгоритм «збурення та спостереження». Побудовано друковану плату системи, розрахованої на потужність сонячної батареї до 60 Вт з підключенням акумулятором та споживачем напругою до 30 В. Було перевірено працездатність системи та проемільовано різні варіанти роботи системи для різних умов освітленості.

**Ключові слова** — система слідування за точкою максимуму потужності; two-switch buck-boost converter; метод збурення та спостереження.

## ВСТУП

Використання контролерів знаходження точки максимальної потужності (ТМП) зумовлене особливістю сонячних батарей (СБ), що використовуються як джерело сонячної енергії [1]. В деяких випадках СБ можна безпосередньо підключати до споживача, однак треба враховувати необхідність забезпечення певних параметрів напруги споживача, що неможливо через нелінійну криву навантаження СБ та залежність від рівня освітленості та температури. Тому між СБ та споживачем встановлюють перетворювач, що може змінювати рівень електричної напруги та її форму [2]. Основним методом збільшення ефективності перетворювача є знаходження ТМП, яка може постійно зміщуватись [3]. Дуже важливо при використанні СБ забезпечувати положення робочої точки в околі ТМП, що значно збільшує вихідну ефективність СБ [4]. Для знаходження цієї точки застосовуються різні алгоритми, які використовують окремі параметри СБ, зокрема миттєві значення струму та напруги на виході СБ, її температуру тощо [5].

Контролери знаходження ТМП можуть використовуватися для живлення на постійній чи змінній напрузі, в залежності від потреб споживача. Основною частиною контролерів знаходження ТМП є DC-DC перетворювач з використанням широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що дає можливість відбирати максимальну потужність з СБ, що передається до споживача [2].

В даній статті розглядається побудова контролера знаходження ТМП СБ, який має працювати в заданому діапазоні струму та напруги. Враховуючи структуру системи та необхідні параметри роботи, для його побудови необхідно брати до уваги різні схемотехнічні рішення для силової частини, а також методики знаходження точки максимальної потужності для схеми керування [5], [6].

Отримавши таку систему, наступним постає задача перевірки загальної працездатності у заданому діапазоні змін струму та напруги, а також спроможність реагувати на зміни значень струму і напруги та зовнішніх умов, що безпосередньо впливають на роботу СБ.

Тому, метою роботи є експериментальна перевірка роботи системи знаходження ТМП при зміні освітленості і споживача.

## ПОРЯДОК ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ

Основним принципом роботи системи є передача сонячної енергії від СБ через DC-DC перетворювач до споживача. Така система також містить давачі струму та напруги на виході СБ; виміри з давачів потрапляють до мікроконтролера, де розраховується миттєве значення потужності і в залежності від цього, приймається рішення про зміну керуючих сигналів, що прямують через драйвери до транзисторів DC-DC перетворювача.

На основі приведенного опису була побудована структурна схема, яка представлена на Рис. 1. На зображеній структурній схемі представлені складові частини контролера знаходження ТМП, а також під'єднані до контролера СБ, споживач та акумулятор. Акумулятор відбирає енергію, яка не використалася споживачем та віддає – при недостатніх значеннях енергії на виході СБ. Також від акумулятора енергія передається до блоку

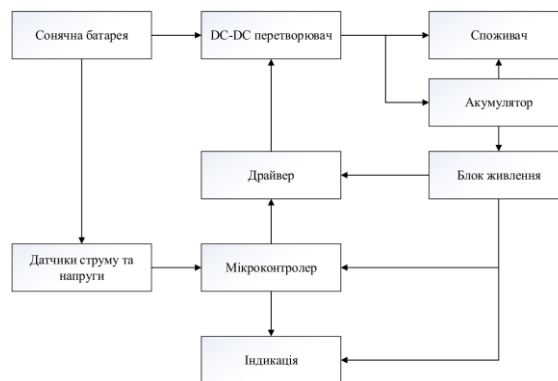


Рис. 1 Структурна схема

живлення, що представляє собою понижуючий DC-DC перетворювач та використовується для живлення системи керування: мікроконтролера, драйвера та індикації. Індикація у свою чергу необхідна для відображення корисної інформації, як наприклад значення напруги на СБ та іншу інформацію, що може бути корисною для відлагодження та налаштування системи. На даному етапі індикація представлятиме собою невеликий дисплей, але у

подальшому можна розширювати кількість індикацій роботи для зручності та гнучкості користування системою.

Для реалізації силової частини (DC-DC перетворювач) була вибрана схема Two-Switch Buck-Boost (Рис. 2), перевагою якої є наявність понижуючого (через керування ключем S1) та підвищуючого (керування S2) режиму роботи, а також відсутність інверсії напруги на виході, як у схемі звичайного buck-boost перетворювача, та менша навантаженість на транзистори і діоди, як у схемі SEPIC [7]. Також перевагою вибраної схеми є розміщення ключа на вході схеми, через що у схемі можна вимірювати напругу холостого ходу, а отже використовувати цю напругу для знаходження ТМП, у такий спосіб збільшивши можливу кількість методів пошуку ТМП.

Для тестування системи необхідно емулювати сонячну батарею. Використання реальних СБ потребують спеціального обладнання для вимірювання температури та спеціальних погодних умов, які б могли забезпечити зміну саме розглянутих параметрів, через що для тестування використовується лінійна апроксимація ділянки в околі ТМП вольт-амперної характеристики (ВАХ) СБ при різних значеннях освітленості.

В загальному випадку сонячну батарею представляють як ідеальне джерело струму з паралельно під'єднаними діодом та шунтом, а також послідовним резистором (Рис. 3) [8], [9].

З приведеної еквівалентної схеми можна вивести таке рівняння:

$$I = I_L - I_D - I_{SH}, \quad (1)$$

де  $I$  – вихідний струм батареї;  $I_L$  – фотозгенерований струм;  $I_D$  – струм діоду;  $I_{SH}$  – струм шунта.

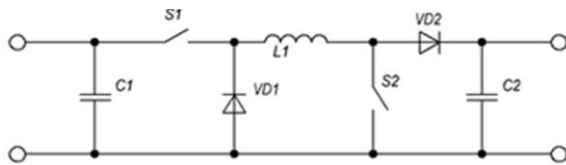


Рис. 2 Схема two-switch buck-boost перетворювача

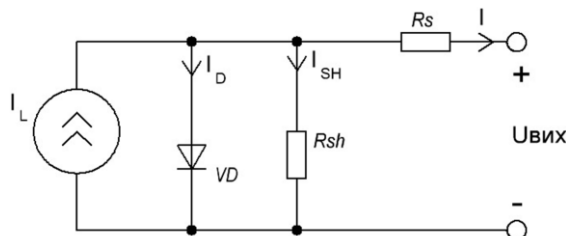


Рис. 3 Еквівалентна схема сонячної батареї

Струм діоду визначається наступною формулою [9]:

$$I_D = I_0 \cdot \left[ \exp \left( \frac{U + I \cdot R_S}{n V_T} \right) - 1 \right], \quad (2)$$

де  $I_0$  – зворотній струм насичення діода;  $U$  – вихідна напруга сонячної батареї;  $R_S$  – опір послідовного резистору;  $n$  – коефіцієнт ідеальності діоду (дорівнює приблизно 1,4);  $V_T$  – теплова напруга (при 25°C  $V_T \approx 0,0259$  В).

А струм шунта дорівнює [9]:

$$I_{SH} = \frac{U + I \cdot R_S}{R_{SH}}, \quad (3)$$

де  $R_{SH}$  – опір шунту.

Підставивши рівняння (2) і (3) у рівняння (1), можна вивести:

$$I = I_L - \left[ I_0 \cdot \exp \left( \frac{U + I \cdot R_S}{n V_T} \right) - 1 \right] - \frac{U + I \cdot R_S}{R_{SH}}. \quad (4)$$

Рівняння (4) можна використовувати для побудови апроксимованих навантажувальних кривих. У наступному розділі визначаються значення параметрів рівняння та будуються ВАХ.

Для вирішення поставлених задач необхідно побудувати експериментальну установку та розробити метод перевірки роботи при різних можливих параметрах роботи СБ.

#### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Виходячи з описаних завдань, було розроблено та побудовано друковану плату системи знаходження ТМП (Рис. 4), яка готова для під'єднання до сонячної батареї та споживача. Дана плата виконана за допомогою з'єднання декількох модулів, завдяки чому можна замінити чи додавати окремі елементи та відлагоджувати систему, що зручно на етапі розробки та тестування.

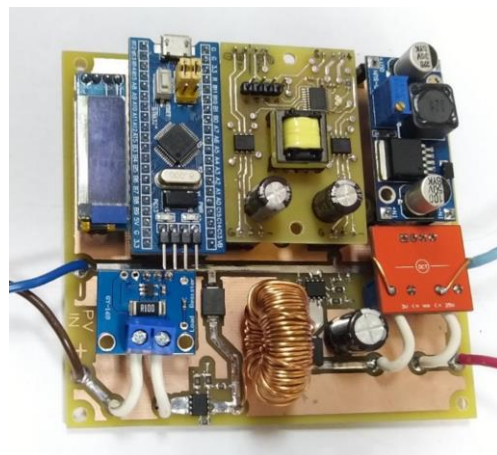


Рис. 4 Фото зібраної системи

Основні елементи, що використовуються у системі: транзистор MOSFET n-типу – IRF7341; мікроконтролер – STM32F103C8; понижуючий DC-DC – LM2596; модуль драйвера для MOSFET,



побудований на базі 1EDI20I12MF та STM8S003F3P з гальванічною розв'язкою.

Елементи DC-DC перетворювача вибиралися відповідно до робочих значень напруги і струму на відповідних елементах та частоти їх роботи. При цьому робочі значення елементів відрізняються у підвищуючому та понижуючому режимах, що також необхідно враховувати при виборі елементів. Вибраний мікроконтролер відрізняється швидкістю, доступністю та універсальністю, що дозволяє використовувати його для передачі сигналу до дисплею, керуванню DC-DC перетворювачем та прийманню сигналів з усіх давачів, при цьому мікроконтролер має вільні виводи та інтерфейси передачі даних, що також плануються використовувати для розширення функціоналу системи модулями, зокрема для дистанційного індикації стану системи.

Побудована система розрахована на напругу сонячної батареї до 30 В та струму до 2 А.

Для роботи зібраної системи необхідно задати алгоритм роботи системи керування, за основу якого

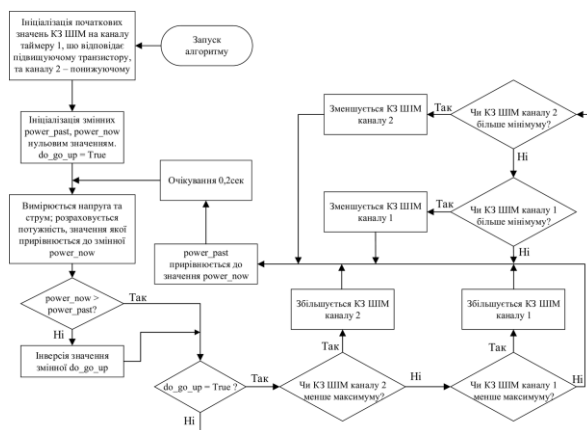


Рис. 5 Алгоритм роботи мікроконтролера

був взятий метод «збурення та спостереження» [5]. В загальному алгоритм роботи мікроконтролера представлений на Рис. 5, де керування DC-DC перетворювачем відбувається за допомогою зміни коефіцієнту заповнення (КЗ) ШІМ керуючої напруги, що подається на затвор транзисторів. Мінімальні та максимальні значення КЗ додатково обраховуються для забезпечення безпечної роботи системи. Метод має деякі модифікації через наявність можливості роботи як у підвищуючому так і понижуючому режимах вибраного DC-DC перетворювача.

Через особливості структури DC-DC перетворювача система керується двома коефіцієнтами заповнення: один – для ключа S1 (Рис. 2), який керує понижуючим режимом роботи, а при підвищуючому завжди дорівнює 100%; другий – для ключа S2, який керує підвищуючим режимом, та дорівнює 0% при понижуючому. Для зручності, в зображеному алгоритмі ці коефіцієнти об'єднані в один, через те, що при досягненні 100% коефіцієнту заповнення ключа S1, цей коефіцієнт залишається

100% і починається збільшуватись коефіцієнт ключа S2, та навпаки.

Для емуляції роботи СБ та зміни освітленості аналітично було побудовано ВАХ СБ при різних рівнях освітленості.

Використовуючи рівняння (4) та підставивши типові значення коефіцієнтів:  $n$ ,  $V_T$ , та підібравши такі значення величин:  $I_0 = 1 \cdot 10^{-9}$  А,  $R_S = 1 \cdot 10^{-3}$  Ом,  $R_{SH} = 1,65$  Ом,  $I_L = 0,8 \dots 1,5$  А, для побудови близької до реальної ВАХ. Отримавши рівняння ВАХ, можна змінювати значення фотозгенерованого струму  $I_L$ , що відповідає зміні освітленості. На Рис. зображені криві навантаження СБ та прямі, що лінійно апроксимують криві у околі точки максимальної потужності (I-III).

Отримавши аналітичні рівняння прямих, можна знайти необхідні значення для відтворення цих прямих за допомогою зовнішнього джерела живлення з регульованою напругою та резистора, з'єднаних послідовно та підключених до входу системи замість СБ. Отже, пряма I відповідає значенню напруги джерела живлення 14,1 В та послідовного опору ( $R_S$ ) 6,76 Ом; пряма II відповідно – 13,7 В та 9 Ом; пряма III – 12,4 В та 14,7 Ом.

Розглянемо роботу системи з входною енергією, для якої діапазон значень напруги та струму визначається зображеною на Рис. вольт-амперною характеристикою прямих I-III. Система починаючи з точки холостого ходу прямої I: відповідно до алгоритму, напруга та струм поступово наближаються до точки максимальної потужності, напрямком позначено стрілкою 1; перейшовши цю точку, контролер постійно збільшує чи зменшує значення коефіцієнту заповнення DC-DC перетворювача (стрілка 2), таким чином знаходячись у околі шуканої точки та віддаляючись від неї на один крок; після переходу у режим навантажувальних прямої II за допомогою перемикачання напруги та зміни опору, тобто імітуючи зменшення освітленості, робоча точка різко зміщується (стрілка 3), при цьому потужність зменшується, тому контролер змінює

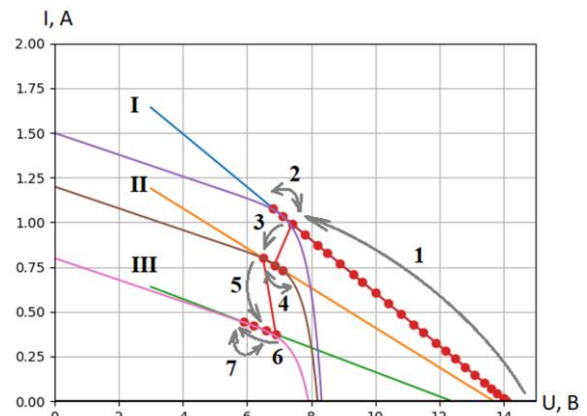


Рис. 6 Навантажувальні криві та ілюстрація роботи

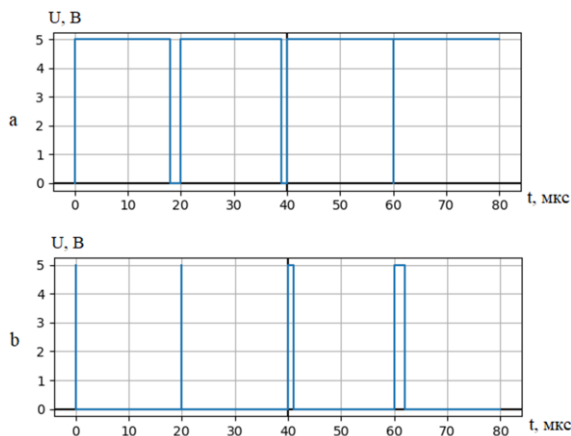


Рис. 7 Часові діаграми системи в момент переходу режимів

напряв зміни коефіцієнту заповнення, після чого повторюється пошук точки та коливання біля її околу (стрілка 4), цей процес повторюється і при переході на пряму III (стрілки 5-7).

На Рис. наведені часові діаграми керуючої напруги, що подається на транзистори під час переходу перетворювача з понижуючого до підвищуючого режиму роботи. Коефіцієнт заповнення першого транзистора (S1 на Рис. 2) досягає максимуму на 40 мкс (Рис. ), при цьому в цей же момент другий транзистор (S2 на Рис. 2) починає відкриватися, а коефіцієнт заповнення стає більшим нуля (Рис. ).

### ВИСНОВКИ

Таким чином, у роботі було побудовано структурну схему системи знаходження ТМП та відповідно неї вибрано схему силової частини і системи керування, а також необхідні допоміжні елементи системи. Розроблена та побудована друкована плата пропонованої системи, в якій були приєднані всі вибрані елементи системи. Розглянуто вплив освітленості на зміну робочих параметрів системи та протестовано роботу системи у заданому діапазоні напруги. Продемонстровані часові діаграми переходу керуючої напруги системи з понижуючого у підвищуючий режим роботи DC-DC перетворювача.

Розроблена система відрізняється простотою, модульністю та гнучкістю налаштування, а також, за рахунок вибраного DC-DC перетворювача, можливістю роботи у понижуючому і підвищуючому режимах та потенційним використанням декількох методів знаходження ТМП. А отже система має переваги у використанні та дослідженні різних входних та вихідних пристроїв, а також модифікації системи керування, для дослідження чи доповнення функціоналу системи.

Після виконаної роботи відкриваються перспективи вдосконалення, а також випробування системи, використовуючи різні СБ та споживачі при різних погодних умовах. При цьому планується використання додаткових модулів з безпроводними технологіями для дистанційної індикації[10], що можливо виконати завдяки модульності системи та функціоналу вибраного МК.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Wikipedia Contributors, "Maximum power point tracking," *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2020. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Maximum\\_power\\_point\\_tracking&oldid=943845013](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Maximum_power_point_tracking&oldid=943845013). [Accessed: 12-Apr-2020].
- [2] Weidong Xiao, *Photovoltaic Power System*. John Wiley & Sons Ltd., 2017, ISBN: 9781119280361.
- [3] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values," in *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2007, pp. 2392–2396, DOI: 10.1109/ISIE.2007.4374981.
- [4] J.-M. Kwon, K.-H. Nam, and B.-H. Kwon, "Photovoltaic Power Conditioning System With Line Connection," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1048–1054, Jun. 2006, DOI: 10.1109/TIE.2006.878329.
- [5] R. Faranda and S. Leva, "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems," *WSEAS Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 6, pp. 446–455, 2008, URL: <http://www.wseas.us/e-library/transactions/power/2008/27-545.pdf>.
- [6] B. K. Bose, P. M. Szczesny, and R. L. Steigerwald, "Microcomputer Control of a Residential Photovoltaic Power Conditioning System," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, no. 5, pp. 1182–1191, Sep. 1985, DOI: 10.1109/TIA.1985.349522.
- [7] Haifeng Fan, "Design tips for an efficient non-inverting buck-boost converter," *TI Analog Appl. J.*, vol. 3Q, pp. 20–25, 2014, URL: <http://www.ti.com/lit/an/slyt584/slyt584.pdf>.
- [8] M. A. G. de Brito, L. Galotto, L. P. Sampaio, G. de A. e Melo, and C. A. Canesin, "Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1156–1167, Mar. 2013, DOI: 10.1109/TIE.2012.2198036.
- [9] Wikipedia Contributors, "Theory of solar cells," *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2020. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Theory\\_of\\_solar\\_cells&oldid=944258832](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Theory_of_solar_cells&oldid=944258832). [Accessed: 12-Apr-2020].
- [10] Y. Wenbo, W. Quanyu, and G. Zhenwei, "Smart home implementation based on Internet and WiFi technology," in *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*, 2015, pp. 9072–9077, DOI: 10.1109/ChiCC.2015.7261075.

## ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ДЛЯ РОЗРОБКИ MRPT-КОНТРОЛЕРУ

Виходячи с сучасного темпу розвитку технологій з'являється потреба у вдосконаленні вже існуючих електронних виробів за допомогою технологій інтернету речей [1, с.363–388]. Для прикладу MRPT контролери невеликої потужності, що використовуються як посередники між сонячною батареєю та споживачем, які часто встановлюються неподалік осель [2, с 21], але при цьому розташовуються у місцях доступ до яких може бути обмежений. Тому за допомогою технологій інтернету речей можна, використовуючи уже наявні у більшості користувачів пристрої, що підключені до інтернет мережі, дистанційно отримувати інформацію та керувати MRPT контролером. При цьому при інтеграції технологій інтернету речей, можна визначити такий набір дистанційного та безпроводного функціоналу:

- відображення значень потужності від сонячної батареї, а отже і інтенсивності сонячного випромінювання;
- відображення значення заряду акумулятора, та його можливого розряду чи повного заряджання;
- ведення журналу змін значень різних параметрів у часі;
- ввімкнення чи вимкнення пристрою;
- вибір методів знаходження точки максимальної потужності.

Окрім виведення корисних параметрів та їх змін у часі, також можливе як повне вимкнення пристрою, так і перехід у неактивний режим, у якому потужність сонячної батареї не буде передаватися до споживача. Крім цього можливість вибору програмних методів знаходження точки максимальної потужності дозволяє підлаштовувати пристрій відповідно змін умов навколишнього середовища, під час яких деякі методи можуть змінювати свою ефективність та потребують корегування чи заміну іншим методом.

Для виконання такої задачі необхідно використовувати спеціальний цифровий модуль, який буде сумісний з системою керування MPPT контролера, та мати антену розраховану на частоту, що відповідає стандартам мереж IEEE 802.11 [3]. При цьому за рахунок розвитку інтернет технологій використання таких модулів як NodeMCU, на основі мікроконтролеру ESP8266, не позначиться на загальній собівартості [4].

В залежності від можливостей модулю та його налаштування можливі такі конфігурації мережі:

- створення окремої безпроводної точки доступу;
- використання існуючої безпроводної локальної мережі;
- використання додаткового обчислювального пристрою в локальній мережі;
- використання серверу або хмарних технологій.

В залежності від приведених конфігурацій доступ до MPPT контролеру може відбуватися при підключенні пристрою з можливістю доступу до інтернету, наприклад смартфона чи ноутбуку, до окремо створеної безпроводної точки доступу, чи при під'єднанні до існуючої мережі. При використанні серверу чи хмарних технологій, доступ можна отримати через будь-який пристрій підключений до мережі інтернет.

Для безпосереднього керування необхідно також визначити інтерфейс користувача, який може бути розроблений для виконання у звичайному інтернет браузері, у вигляді окремого програмного додатку для різних платформ або інтегруватися в уже існуючі програмні застосунки інтернету речей.

Таким чином, впровадження технологій дистанційного доступу та інтернету речей дозволить значно збільшити функціонал MPPT контролерів, при цьому суттєво не впливаючи на загальну собівартість.

### Література:

1. Balaji, S., Nathani, K. & Santhakumar, R. IoT Technology, Applications and Challenges: A Contemporary Survey. *Wireless Pers Commun* 108 (2019), с.363–388.
2. Weidong Xiao, *Photovoltaic Power System*. John Wiley & Sons Ltd., 2017, с.21.
3. Hiertz, G., Denteneer, D., Stibor, L., Zang, Y., Costa, X., & Walke, B. (2010). The IEEE 802.11 universe. *IEEE Communications Magazine*, 48(1), с.62–70.
4. Офіційний сайт компанії Espressif [Електронний ресурс]. – «ESP8266 Series of Modules» – Режим доступу:  
<https://www.espressif.com/en/products/modules/esp8266>.

## ABSTRACT

The work is executed on 96 pages, contains 3 application, 48 illustrations, 18 tables, 46 literary sources of information.

The demand for renewable energy sources, in particular solar, has been increasing. This is happening due to a decrease in demand of other types of energy sources such as fossil fuel. The reasons for that is often a bad reputation, waste product and the limitation of available resources. The growing popularity of solar energy, in particular photovoltaics, significantly reduces the cost and increases the availability of solar energy. Some of advantage of photovoltaics is the absence of the need to use water, as well as the ability to have small-sized modules that can be used to power small devices or buildings remote from the power grid.

Photovoltaics can be used immediately as a source of direct voltage, but its voltage is unstable and very much depends on weather conditions. Therefore, an intermediate converter is always used to connect the photovoltaics modules, which can be selected depending on the needs of the customer, and used to obtain either DC voltage to charge small devices, batteries or AC voltage for household appliances or other power grid compatibility needs.

An important issue is to increase the efficiency of solar energy. One of the important components of renewable energy sources is the use of DC-DC converters, due to the characteristic of photovoltaics modules that used as a source of solar energy. Due to the non-linear IV curve and the dependence on the level of illuminance and temperature, the power of photovoltaics modules can be different, which makes it impossible to assign static values of current and voltage values to calculate load. When using a photovoltaics, it is important to constantly adjust the consumption in order to be able to track maximum possible power, which significantly increases the original efficiency of a photovoltaics. To find the maximum power, various algorithms are used, which use certain parameters of the photovoltaics, in particular the instantaneous values of output current and voltage of the photovoltaics, its temperature and so on.

In addition, the use of modern wireless technologies is relevant, which with the development of electronics and the Internet are becoming more accessible, and their use in devices significantly increases the functionality and ease of use, which increases the interest of customers.

The purpose of the study is to develop converter for a photovoltaics, using multifunctional solutions of a power electronics for possible use and research of various algorithms of maximum power tracking, as well as control systems, which will allow the use of modern remote data transmission technologies.

To achieve this goal, the following tasks were considered:

- defining the operational parameters;
- review of possible variations of schemes and algorithms for the maximum power point tracking;
- design and calculation of system elements;
- development of a printed circuit board;
- programming of microcontrollers;
- testing the system.

The object of the study is a photovoltaics converter.

The subject of research is development and construction of the photovoltaics converter and the use of wireless technologies.

Theoretical principles are based on the theory of electrical circuits, information technology, theory of information transmission and signal processing, microprocessor programming and documentation for selected devices. Algorithms for maximum power point tracking was researched and implemented. The printed circuit board of the system was built and its operability was investigated.

The scientific value of the obtained results lies in the development of a converter for a photovoltaics module and using wireless technologies with it through the usage of modern digital electronic modules.

The practical value of the results is obtained by offering complete design of the converter with the use of modules for remote control and monitoring via Wi-Fi network. The system was successfully developed, experimentally tested maximum

power point tracking of the photovoltaics modules, including control signals of the driver, as well as demonstrated the operation of the local page in an Internet browser which displayed instant values of current and voltage from sensors.

Approbation of dissertation results was held at the international scientific-practical Internet conference "Autumn Scientific Readings".

Publications. The result of the dissertation are published in 2 scientific works in collections of scientific and technical conferences.