

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Ігоря
Сікорського»**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ
АПАРАТУРИ**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Лисенко О.М.

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ___ ” _____ 20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 6.050902 РАДІОЕЛЕКТРОННІ АПАРАТИ
(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

на тему Автоматизована система визначення параметрів моделі
сонячних елементів

Виконав: студент IV курсу, групи ДК-52

Гуменюк Дмитро Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник доцент, канд. техн. наук Яганов П.О.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ - 2019 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання Дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	16.03.19-26.03.19	виконано
2	Вибір елементної бази та друкованої плати	26.03.19-02.04.19	виконано
3	Схемо-технічне проектування	02.04.19-09.04.19	виконано
4	Виконання креслень схеми електричної принципової	09.04.19-23.04.19	виконано
5	Конструкторсько-технологічні розрахунки	23.04.19-30.04.19	виконано
6	Електричний розрахунок друкованої плати	30.04.19-07.05.19	виконано
7	Розрахунок віброміцності друкованої плати	07.05.19-14.05.19	виконано
8	Проектування у Altium Designer	14.05.19-21.05.19	виконано
9	Виконання креслень друкованої плати та складального креслення друкованого вузла	21.05.19-28.05.19	виконано
10	Оформлення пояснювальної записки	28.05.19-12.06.19	виконано

Студент _____ Гуменюк.Д.В
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту _____ Яганов П.О
(підпис) (прізвище та ініціали)

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

Освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр

Спеціальність 6.050902 РАДІОЕЛЕКТРОННІ АПАРАТИ
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Лисенко О.М.
(підпис) (прізвище ініціали)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Гуменюку Дмитру Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Автоматизована система визначення параметрів моделі сонячних елементів

керівник проекту Яганов Петро Олексійович, доцент, к.т.н

затвержені наказом по університету від 27.05.2019 року №1405с

2. Термін подання студентом проекту 12 червня 2019 року

3. Вихідні дані до проекту. Автоматизована установка для вимірювання параметрів сонячних елементів має відповідати наступним вимогам:

- вимірювати світлову і темнову ВАХ сонячного елементу в автоматичному режимі;

- вимірювання освітленості і температури;
- взаємодія системи із віртуальним пристроєм в середовищі графічного програмування LabVIEW;
- візуалізацію і зберігання даних.

До основного функціоналу системи можна віднести:

- цифрове керування струмом, вимірювання струму та напруги;
- цифрове керування опором;
- передача даних на ноутбук.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

- аналіз технічного завдання та огляд літератури за темою проекту;
 - аналіз методів слідкування за точкою максимальної потужності;
 - дослідження підходів до побудови моделі сонячних елементів
- розробка структурної схеми та пояснення принципу роботи модулю;
- огляд наявних систем автоматизованого визначення параметрів СЕ;
 - розробка структурної схеми та принцип роботи пристрою;
 - вибір та обґрунтування елементної бази;
 - основні розрахунки схеми електричної принципової та симуляція її
- роботи обґрунтування вибору класу точності друкованої плати;
- проектування друкованого вузлу;
 - обґрунтування вибору методу виготовлення друкованої плати;
 - вибір класу точності плати та основного кроку координатної сітки;
 - розміщення компонентів та розводка друкованої плати;
 - електричний розрахунок друкованої плати;
 - розрахунок надійності друкованої плати;
 - розрахунок віброміцності друкованої плати;
 - програмування пристрою;
 - експериментальні дослідження;

- висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо):

- креслення коробки;
- схема електрична принципова;
- друкована плата;
- складальне креслення друкованої плати.

6. Дата видачі завдання 16.03.19

Анотація

Роботу викладено на 83 сторінках, вона містить 6 розділів, 38 ілюстрації, 8 таблиць та 35 джерел в переліку посилань.

Метою дипломного проекту є розробка системи для автоматизованого визначення параметрів сонячних елементів для встановлення ТМП, яка відрізняється від аналогічних інженерних рішень простотою реалізації, доступністю апаратно-програмних технологій обробки та візуалізації даних, сумісністю за основними конструкторсько-технологічними показниками з наявними системами слідкування за точкою максимальної потужності.

У ході виконання дипломного проекту були використані методи конструювання і проектування вивчені у курсі: цифрової і аналогової схемотехніки (розрахунок схеми електричної принципової, вибір елементної бази), фізико теоретичних основи конструювання (вибір типу, матеріалу і методу виготовлення ДП; розрахунок надійності ДП; розрахунок віброміцності вузла) і автоматизації конструкторсько технологічного проектування (розміщення КЕ, проектування ДП у Altium Designer).

В ході виконання дипломного проекту була підготовлена публікація за темою дипломного проекту на XII Міжнародну науково-технічну конференцію молодих вчених “Електроніка 2019”. Стаття підготовлена до друку та знаходиться у видавництві фахового видання “Електронна та Акустична інженерія”.

Ключові слова — сонячні елементи; автоматизоване вимірювання ВАХ; визначення параметрів.

Summary

The work is presented on 83 pages, it contains 6 sections, 28 illustrations, 8 tables and 35 sources in the list of references.

In this work an automated system is developed, which allows measuring the light and dark current-voltage characteristics (CVC) of a solar cell (SC). It consists of a STM32 based control unit, a digital-to-analog converter, a voltage-current transformation circuit, a current and voltage sensor and a laptop with a LabVIEW graphical programming environment. An approach for calculating the parameters of the SC model from its CVC is described and used to determine the MPP (maximum power point) of the solar cell module.

During the implementation of the diploma project, the methods of designing and designing were studied in the course: digital and analog circuitry (calculation of the circuit of the electric principle, the choice of elemental base), the physics of theoretical foundations of design (choice of type, material and method of manufacturing the DP, calculation of reliability of the DP, calculation of vibration strength node) and automation of design and technological design (placement of KE, design of the DP in Altium Designer).

During the implementation of the diploma project the paper “Automated system for determining parameters of a solar cell model” presented at the “Electronics 2019” conference and published in the proceedings.

Keywords - alternative energy, solar cells, automated determination of parameters;

**Пояснювальна записка
до дипломного проекту**

на тему: **Автоматизована система визначення параметрів моделі
сонячних елементів**

Київ – 2019 року

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів	4
ВСТУП	5
Розділ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ОГЛЯД НАУКОВО ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ПРОЕКТУ	8
1.1 Аналіз методів слідкування за точкою максимальної потужності	8
1.2 Дослідження підходів до побудови моделі сонячних елементів	12
1.2.1 Вибір схеми заміщення сонячного елемента	13
1.2.2 Способи визначення параметрів моделі	14
1.3 Огляд наявних систем автоматизованого визначення параметрів СЕ	17
Висновок до розділу 1	19
Розділ 2 СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ПРИСТРОЮ	21
2.1 Розробка структурної схеми та принцип роботи пристрою	21
2.2 Вибір та обґрунтування елементної бази	23
2.2.1 Вибір мікроконтролера	23
2.2.2 Вибір операційних підсилювачів	24
2.2.3 Вибір транзисторів	24
2.2.4 Вибір датчика струму	25
2.2.5 Вибір датчика освітленості і температури	25
2.3. Основні розрахунки схеми електричної принципової та симуляція її роботи	26
2.3.1 Драйвер ЦАП	27
2.3.2 Програмоване джерело струму	31
2.3.3 Керований опір	33
2.3.4 Драйвер реле	34
Висновки до розділу 2	35
Розділ 3 ПРОЕКТУВАННЯ ДРУКОВАНОГО ВУЗЛУ	37
3.1 Вибір типу, матеріалу друкованої плати	37

					<i>ДК52.4 11734.001 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>	<i>Гцименяк</i>				<i>Автоматизована система визначення параметрів моделі сонячних елементів Пояснювальна записка</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Перевірив</i>							1	
<i>Реценз.</i>						<i>НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», ФЕЛ, гр. ДК-52</i>		
<i>Н. Контр.</i>	<i>Лисенко О.І.</i>							
<i>Затвердив</i>	<i>Яганов П.О.</i>							

3.2 Вибір класу точність плати та основного кроку координатної сітки	37
3.3 Розміщення компонентів та розводка друкованої плати	38
Висновки до розділу 3	40
Розділ 4 РОЗРАХУНКИ, ЯКІ ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАВИЛЬНІСТЬ КОНСТРУКТОРСЬКИХ РІШЕНЬ	42
4.1 Виконання конструкторсько-технологічного розрахунку елементів друкованого монтажу	42
4.1.1 Визначення мінімальної ширини провідника для ланцюгів живлення	42
4.1.2 Визначення мінімальної ширини провідника з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому	43
4.1.3 Визначення мінімального діаметру монтажного отвору	44
4.1.4 Визначення мінімальної ширини провідника	45
4.1.5 Визначення відстані між провідником і контактним майданчиком	46
4.1.6 Визначення мінімальної відстані між краями двох сусідніх провідників	46
4.1.7 Визначення мінімальної відстані між контактними майданчиками	47
4.2 Електричний розрахунок друкованої плати	47
4.2.1 Визначення падіння напруги на найдовшому провіднику	47
4.2.2 Потужність втрат друкованої плати	47
4.2.3 Найбільша ємність між двома провідниками	48
4.2.4 Найбільша індуктивність між двома провідниками	49
4.3 Розрахунок надійності друкованого вузла	50
4.4 Розрахунок віброміцності вузла	56
Висновки до розділу 4	58
Розділ 5 ПРОГРАМУВАННЯ ПРИСТРОЮ	59
5.1 Програмування мікроконтролера STM32F303CB	59
5.1.1 Підключення давачів	60
5.1.2 Вимірювання вольт – амперної характеристики	65
5.2 Програмування віртуального пристрою в середовищі LabVIEW	67
Висновки до розділу 5	69

Розділ 6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	70
6.1 Калібрування давача струму і напруги	70
6.2 Визначення параметрів СЕ за його ВАХ	75
6.3 Визначення ТМП за ВАХ	75
Висновки до розділу 6.	77
ВИСНОВКИ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	80
ДОДАТОК А Технічне завдання на проектування	
ДОДАТОК Б Лістинг програми	
ДОДАТОК В Наукова публікація	
ДОДАТОК Г Перелік елементів	
ДОДАТОК Д Специфікація	

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів

ТМП – точка максимальної потужності

СЕ – сонячний елемент

MPPT – (англ. Maximum Power Point Tracking) – слідування за точкою максимальної потужності

ВАХ – вольт-амперна характеристика

P&O – (англ. Perturb&Observe) – алгоритми збурення та спостереження

LSB – (англ. least significant bit) – найменш значущий біт

I_{ϕ} – фотострум, що генерується елементом пропорційно до освітленості

$I_{зв}$ – зворотний струм насичення

q - заряд електрона

k – стала Больцмана

T – температура переходу

A – діодний фактор

					ДК52.4 11734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ВСТУП

Інтенсивне використання традиційних видів палива й поглиблення глобальної енергетичної кризи спонукають до пошуку альтернативних, екологічно чистих, поновлювальних джерел енергії.

Серед відновлених джерел енергії сонячна енергетика є одним з найперспективніших напрямків. Використання фотоелектричних систем для виробництва електроенергії розпочалося в сімдесятих роках 20 століття і в даний час швидко зростає. У 2009 році загальна потужність встановлених в світі сонячних батарей складала 23 ГВт, а в 2011 зроста і складала 65 ГВт. Європейська асоціація фотоелектричної промисловості очікує, що глобальна потужність сонячних батарей досягне 200 ГВт до 2020 року і 800 ГВт до 2030 року [1].

Такий стрімкий розвиток фотоелектричної енергетики спонукає до більш детального вивчення характеристик сонячних елементів. Особливо актуальним є дослідження алгоритмів відстеження точки максимальної потужності (ТМП). В даній точці сонячний елемент (СЕ) функціонує найбільш ефективно і до навантаження надходить максимальна вихідна потужність. Точка максимальної потужності на вольт-амперній характеристиці СЕ залежна передовсім від освітлення і температури.

Ця залежність є важливою для створення алгоритмів слідкування за ТМП, на базі моделі сонячного елемента. Вона може бути описана рівнянням, параметрами якого є освітленість та температура со. Параметри СЕ визначатимуться із його вольт-амперних характеристик.

Це спонукає до розробки систем, які б автоматизовано вимірювали ВАХ СЕ і визначали за ними необхідні параметри. Існуючі системи для визначення параметрів СЕ не є повністю автоматизованими або ж працюють з використанням дороговартісного обладнання.

					<i>ДК52.411734.001 ПЗ</i>	<i>Адк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		5

Розділ 1. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ПРОЕКТУ

1.1. Аналіз методів слідкування за точкою максимальної потужності

Для покращення енергоефективності використання сонячних панелей, використовують імпульсні перетворювачі напруги, що дозволяють керувати вихідною потужністю панелі. Задачею алгоритмів пошуку ТМП є визначення такого значення струму і напруги, при якому потужність від сонячної батареї буде максимальною. ВАХ сонячного елемента є нелінійною і залежить від рівня її освітленості та температури. Типові ВАХ сонячної батареї за різної освітленості та температури наведені на рис. 1.1.

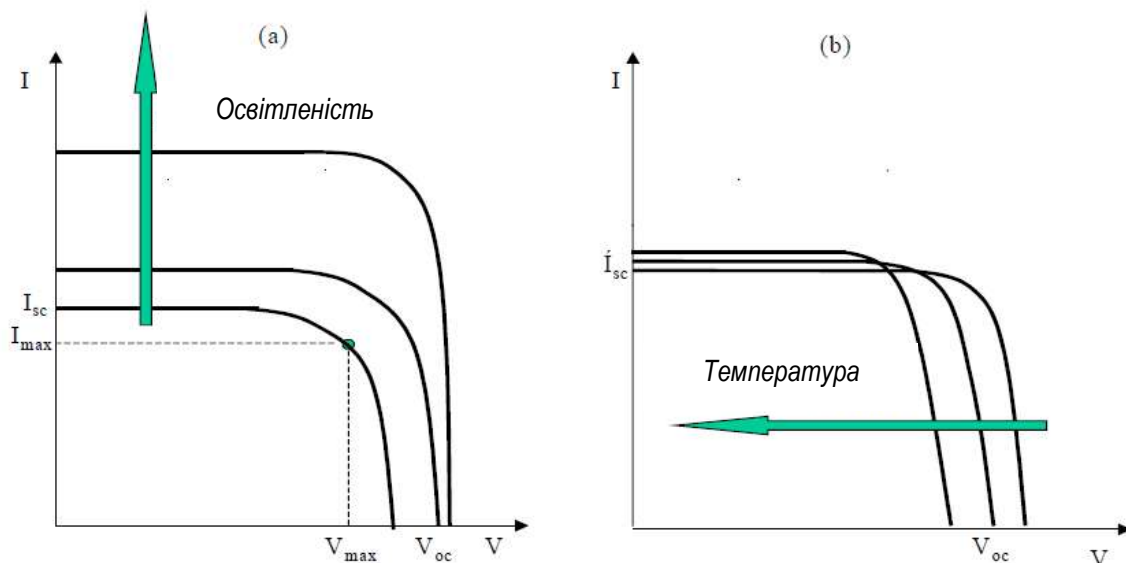


Рис. 1.1 ВАХ сонячного елемента при різних рівнях освітленості і температури

Існує багато методів слідкування за ТМП. Найбільш поширені з них можна умовно можна розділити на 4 групи.

До першої групи належать методи, засновані на алгоритмі збурення і спостереження (англ. – « Perturb and Observe (P&O) ») [2]. В даному алгоритмі довільно задається початкова точка на вольт-амперній характеристиці сонячного елемента. При зміні струму визначають, як змінюється потужність в порівнянні з попереднім кроком. Таким чином встановлюється точка, де потужність максимальна. Алгоритм є простим, однак він не завжди дозволяє точно визначити ТМП. Точки, що знаходяться в околі, постійно перевірятимуться на наявність максимуму потужності, що зменшує ефективність алгоритму (рис.1.2).

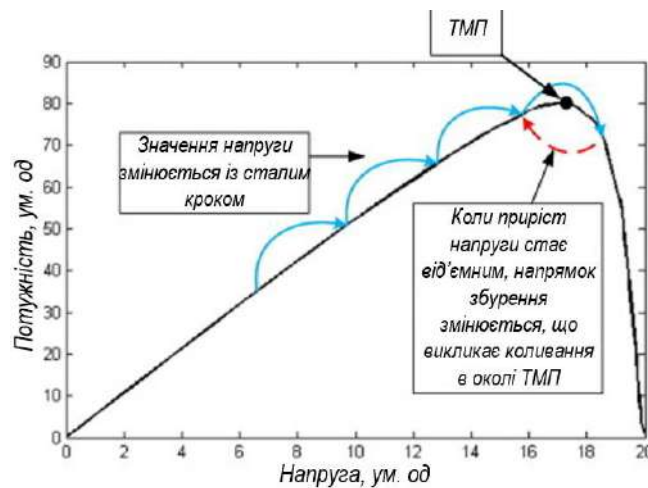


Рис. 1.2 Алгоритм збурення та спостереження

Також при різкій зміні освітленості, наприклад у хмарні дні, випадкові і швидкі зміни потужності сонячного випромінювання можуть призвести до повної втрати ТПМ і неможливості її подальшого виявлення. На рис. 1.3 показано, як невірно визначається напрямок для пошуку ТМП при різкій зміні освітленості і зростанні струму. Був обраний напрямок зменшення напруги, що, насправді не відповідає ТМП, але оскільки струм зріс (через збільшення освітленості), алгоритм продовжує рух в неправильному напрямку.

Були запропоновані вдосконалення алгоритму, які дозволять визначити причину зміни потужності [3] чи зменшити крок збурення при наближенні до ТМП [4], однак вони значно ускладнюють алгоритм і збільшують час його виконання.

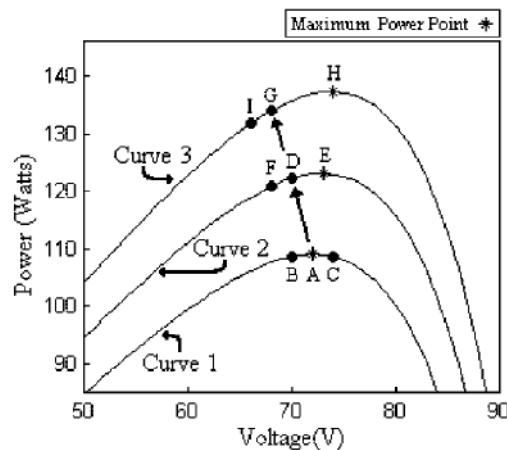


Рис. 1.3 Визначення ТМП при зміні освітленості

До **першої групи** можна віднести і так звані методи «зростаючої провідності» (англ. – «Incremental conductance»). Вони засновані на тому, що похідна від вихідної потужності P за напруги панелі V дорівнює нулю в точці максимальної потужності:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0, \quad (1.1)$$

де I та V струм та напруга на сонячній панелі у певний момент часу.

Таким чином,

$$\left[\begin{array}{l} \frac{\Delta I}{\Delta V} + \frac{I}{V} = 0, \quad \text{у точці максимальної потужності;} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} + \frac{I}{V} > 0, \quad \text{зліва від точки максимальної потужності;} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} + \frac{I}{V} < 0, \quad \text{справа від точки максимальної потужності,} \end{array} \right.$$

де ΔI та ΔV – приріст струму і напруги відповідно.

виробництва їх характеристики можуть відрізнятися. При цьому навчання вимагає значних апаратних та обчислювальних затрат.

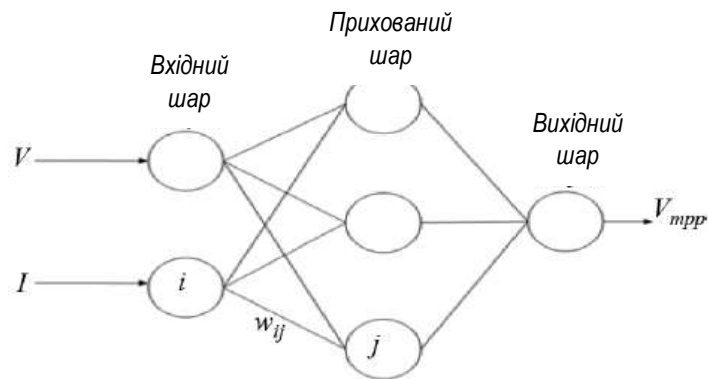


Рис. 1.4 Використання нейронної мережі для визначення ТМП

До **четвертої групи** належать методи, де ТМП обчислюється на базі отриманої моделі сонячного елемента. На нашу думку, методи із цієї групи є одними із найперспективніших, оскільки є простими для програмної реалізації на мікроконтролері: параметри моделі можуть зберігатися в пам'яті мікроконтролера, а ТМП обчислюватиметься за формулою залежності від освітленості і температури [8]. В дипломному проекті детально досліджується саме ця група методів.

1.2. Дослідження підходів до побудови моделі сонячних елементів

Для точного визначення ТМП необхідно використовувати еквівалентну схему СЕ, що найкраще відповідає характеристикам реального сонячного елемента. При цьому, обчислення, необхідні для знаходження параметрів схеми заміщення СЕ, мають бути мінімальними. В даному підрозділі наводиться обґрунтування вибору моделі СЕ на базі 4 невідомих параметрів.

1.2.1 Вибір схеми заміщення сонячного елемента

В літературі виділяють чотири основні схеми заміщення комірки сонячного елемента (рис. 1.5) [9].

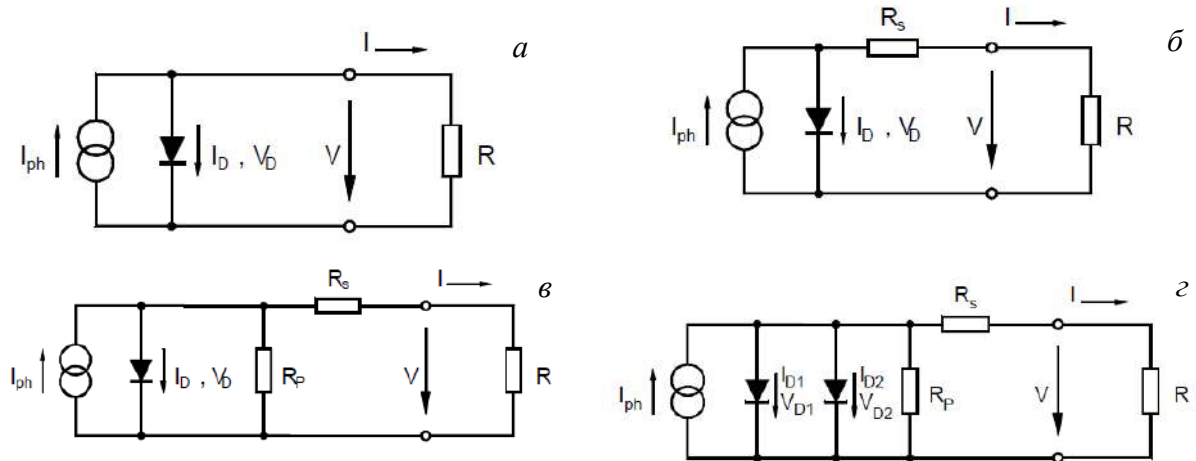


Рис.1.5 Схема заміщення комірки сонячного елемента

Перша схема (рис. 1.5 а) представляє собою ідеалізовану модель і описується рівнянням 1.3:

$$I = I_{\phi} - I_{зв} \cdot (e^{\frac{q}{AkT} \cdot U} - 1), \quad (1.3)$$

де I_{ϕ} – фотострум, що генерується елементом пропорційно до освітленості, $I_{зв}$ – зворотний струм насичення, q - заряд електрона, k – стала Больцмана, T – температура переходу, A – діодний фактор.

Вона дає найменш точні результати, хоча і є найпростішою для обчислень.

Друга схема (рис. 1.5 б) враховує послідовний опір R_n , що складається з опору контактів (опору переходу напівпровідник–метал) і опору напівпровідникового матеріалу, з якого виготовлений елемент. Вона описується рівнянням 1.4:

$$I = I_{\phi} - I_{зв} \cdot (e^{\frac{q \cdot (U + I \cdot R_n)}{AkT}} - 1). \quad (1.4)$$

Дана схема використовувалася в роботах [10], [11] і дозволяла тримати достатньо точне наближення СЕ.

Третя схема (1.5 в) враховує шунтувальний опір $R_{ш}$ і описується рівнянням 1.5:

$$I = I_{\phi} - I_{зв} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (U + I \cdot R_n)}{A k T}} - 1 \right) - \frac{U}{R_{ш}} \quad (1.5)$$

Згідно з [12], дана модель дає точніші результати, але при хорошому рівні освітленості, відмінності між показаннями за другою схемою незначні. Це узгоджується з результатами [13], де вказується, що при відносно великих рівнях засвітлення впливом шунтувального опору можна знехтувати, кома поклавши $R_{ш} \rightarrow \infty$.

Четверта схема (рис. 1.5 г) враховує дифузійний струм та струм від рекомбінації за межами забороненої зони напівпровідника. Вона описується рівнянням 1.6:

$$I = I_{\phi} - I_{зв1} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (U + I \cdot R_n)}{A_1 k T}} - 1 \right) - I_{зв2} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (U + I \cdot R_n)}{A_2 k T}} - 1 \right) - \frac{U}{R_{ш}} \quad (1.6)$$

Вона дає найкращі результати при моделюванні, але потребує складних обчислень.

Для експериментальних досліджень нами була обрана друга схема із 4 невідомими параметрами (I , I_o , A , R_n), з огляду на достовірність та обчислювальні затрати для визначення параметрів.

1.2.2. Способи визначення параметрів моделі.

Параметри сонячного елемента визначають із його вольт-амперних характеристик. Виділяють світлову і темнову ВАХ, типовий вигляд яких наведено на рис. 1.6.

Існує багато способів визначення параметрів із світлової або обох, світлової та темної, ВАХ сонячного елемента. У [14] параметри визначаються із використанням чотирьох точок на світловій ВАХ. ТМП

Для визначення фотоструму I_{ϕ} використовувалася світлова ВАХ сонячного елемента. За встановленим його значенням, можна обчислити фотострум за різних температур і освітленості [19] за рівнянням (1.7):

$$I_{\phi} = I_{\phi.n.y} \cdot \frac{G}{G_c} + a_T \cdot (T - T_c), \quad (1.7)$$

де $I_{\phi.n.y}$ – фотострум, визначений за нормальних умов роботи, G – освітленість СЕ, G_c – освітленість за нормальних умов, при якій визначався $I_{\phi.n.y}$ (2000 люкс), T_c – температура за нормальних умов (25 °С), T – температура СЕ, a_T – температурний коефіцієнт фотоструму.

Зворотний струм насичення діоду $I_{зв}$ та параметр A обчислювалися за прямою гілкою темної ВАХ. Дана ВАХ описується рівнянням 1.8:

$$I = I_{зв} \cdot (e^{\frac{q}{AkT} \cdot U} - 1). \quad (1.8)$$

При струмах $I \gg I_{зв}$ залежність $\ln(I) = f(U)$ представляє пряму, тангенс кута нахилу якої рівний $q/(AkT)$, а відрізок, що відсікається від осі ординат, дає значення $\ln(I_{зв})$.

Зворотній струм за різних температур можна обчислити за формулою 1.9 [18]:

$$I_0 = I_{T_0} \cdot 2^{\frac{T-T_0}{k}}, \quad (1.9)$$

де I_{T_0} – зворотній струм, виміряний за температури T_0 , T – досліджувана температура, k – коефіцієнт, що для кремнію складає 9-10.

Послідовний опір визначався за світловою ВАХ за двох різних рівнів освітленості СЕ. Значення опору розраховувалося за формулою 1.10:

$$R_{п} = \frac{\Delta U_{pz}}{\Delta I_{\phi}}, \quad (1.10)$$

де ΔU_{pz} та ΔI_{ϕ} – різниця напруг розімкненого кола та фотострумів за різних рівнів освітленості.

Таким чином, вимірявши пряму і зворотну ВАХ, можна отримати наближену модель СЕ, значення параметрів якої залежать від освітленості та температури.

1.2. Огляд наявних систем автоматизованого визначення параметрів СЕ

При неавтоматизованих вимірюваннях, темнову вольт-амперну характеристику СЕ отримують, задаючи значення напруги на СЕ джерелом напруги та визначаючи струм, що протікає крізь СЕ. Для вимірювання світлової характеристики, СЕ підключають до змінного резистора. Змінюючи опір резистора, вимірюють струм та напругу на зразку. Такі вимірювання забирають багато часу та обмежені за точністю діапазоном напруг джерела живлення та плавністю механічного налаштування резистора.

З метою пришвидшення та підвищення точності вимірювань, запропоновано ряд систем для автоматизованої побудови ВАХ і визначення параметрів СЕ.

В патенті [20] запропонована установка для вимірювання світлової і темної ВАХ. Вимірювання виконуються автоматично, при цьому передбачено механізм у вигляді рухомої стрічки для почергового вимірювання партії сонячних елементів. Наявний окремий блок для регулювання рівнем освітленості елемента і його повного затемнення. Дані з датчиків надходять до блоку управління у вигляді (комп'ютера або мікропроцесора), а результати вимірювань відображаються на дисплеї. Деталі реалізації схеми вимірювань відсутні, однак відомо, що послідовний опір визначається за методом двох рівнів освітленості, а всі інші параметри - методом підбору.

					<i>ДК52.411734.001 ПЗ</i>	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

В патенті [21] запропонована схема для вимірювання ВАХ, яка включає в себе програмоване джерело струму та напруги, які підключаються мультиплексором в залежності від ВАХ, яку потрібно виміряти (рис. 1.7).

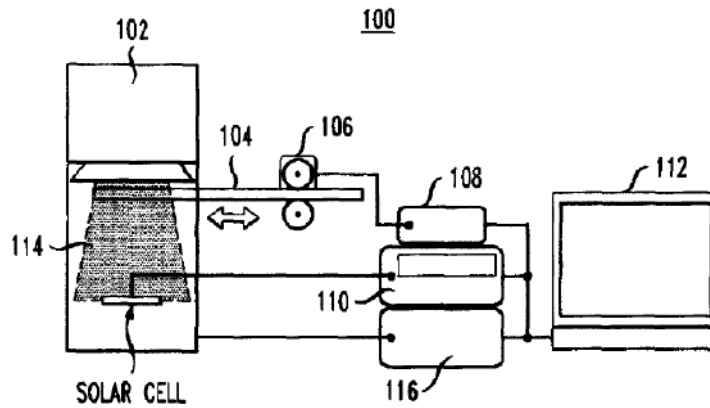
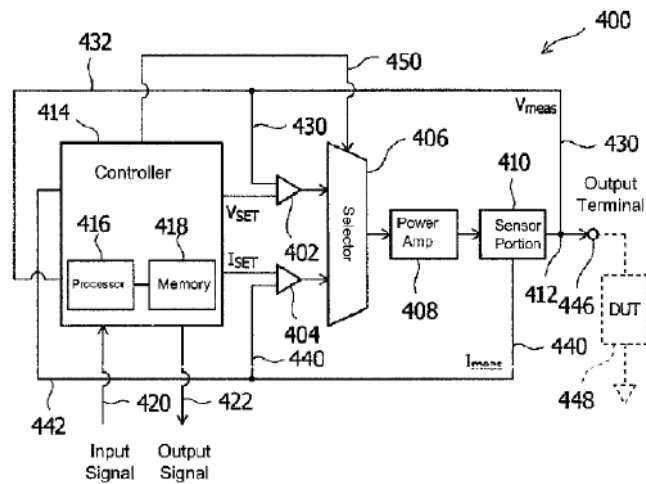


Рис. 1.7 Установка для автоматизованого вимірювання ВАХ



1.8 Схема для вимірювання ВАХ

Схема керується мікропроцесором, однак не оптимізована для вимірювання ВАХ сонячних елементів і потребує додаткових схемотехнічних рішень.

В статті [22] описана установка для вимірювання світлової і темної ВАХ сонячного елемента. Вона включає в собі 8-бітний мікроконтролер серії AVR, цифро-аналоговий перетворювач та МОН транзистор в якості

керованого навантаження. В якості датчика струму використовується датчик на базі ефекту Хола, а напруга вимірюється АЦП мікроконтролера. Датчики на ефекті Хола використовуються для вимірювання струмів від порядку десятків міліампер до кількох Ампер і не є оптимальним для прецизійних вимірювань. Дані від датчиків передаються на мікроконтролер і далі надходять до послідовного порту комп'ютера, де виконується обробка даних в середовищі LabVIEW.

Дана установка була обрана в якості прототипу для розробки на дипломний проект. В ході проектування дана схема була оптимізована з використанням сучасної елементної бази, зокрема:

- з використанням 32 бітного мікроконтролера серії STM32F4 із вбудованим модулем для обчислень із плаваючою комою (FPU), що дозволить виконувати попередню обробку даних від датчиків на мікроконтролері;
- з прецизійним вимірювачем струму та напруги на базі резистивного датчика, з точністю вимірювання струму 25 мкА;
- з можливістю запису ВАН на SD карту пам'яті, що підключатиметься до мікроконтролера, що дозволить зменшити час вимірювань;
- інтерфейсом в середовищі LabVIEW та цифровим дисплеєм для попередньої обробки даних.

Висновки по розділу 1.

1. Проаналізовано найбільш поширені підходи до слідкування за точкою максимальної потужності. Зокрема ті, що базуються на методі збурення і спостереження, зростання провідності, сталої напруги та струму, використанні нейронних мереж та моделюванні сонячного елемента.

ДК52.411734.001 ПЗ

Адк.

19

Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата	

2. Для подальшого дослідження обрані методи, що визначають ТМП із використанням моделі сонячного елемента. Обрано схему заміщення СЕ, що включає в себе 4 невідомі параметри.

3. Для знаходження значень параметрів використовуватиметься світлова ВАХ сонячного елемента за кількох різних рівнів освітленості, а також темнова ВАХ.

4. Обрано прототип пристрою для автоматизованого визначення параметрів сонячного елемента.

					<i>ДК52.411734.001 ПЗ</i>	<i>Адк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>20</i>

Розділ 2. СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ПРИСТРОЮ

2.1. Розробка структурної схеми та принцип роботи пристрою

Пристрій для визначення параметрів сонячного елемента розроблявся з огляду на можливість автотомізованого вимірювання як світлової, так і темної ВАХ сонячного елемента.

Структурна схема установки для автоматизованого визначення параметрів сонячного елемента зображена на рис.2.1.

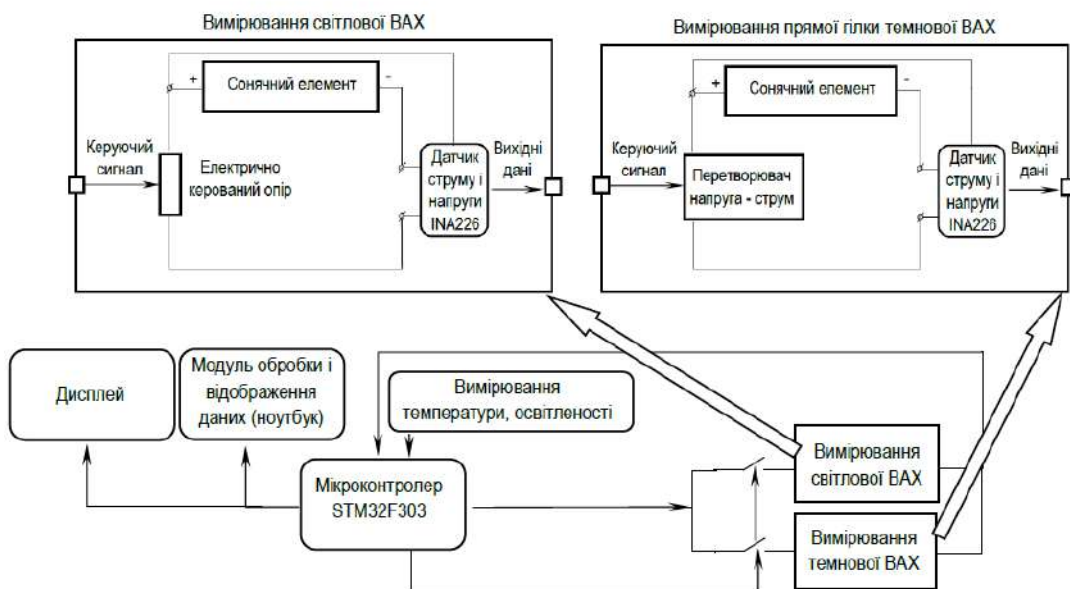


Рис. 2.1 Блок схема установки для автоматизованого вимірювання параметрів СЕ

Даний пристрій вимірює світлову і темнову ВАХ сонячного елемента, визначаючи при цьому рівень температури та освітленості. Отримані дані передаються для подальшої обробки на ноутбук. Передбачено також вивід даних на портативний рідинно-кристалічний дисплей.

Установка складається з керувального пристрою (мікроконтролер STM32F303CB), схеми перетворення напруга–струм, керованого опору,

вимірювача струму і напруги, ноутбука із середовищем графічного програмування LabVIEW та досліджуваного зразка.

Вимірювання ВАХ відбувається почергово. Для вимірювання темної ВАХ, керувальний сигнал з виходу ЦАП мікроконтролера надходить на схему перетворення напруга-струм. Дана схема задає певне значення струму, що протікає крізь зразок. Змінюючи напругу на вході перетворювача і вимірюючи напругу на зразку, можна отримати дані для побудови темної ВАХ. Під час вимірювання даної характеристики важливо, щоб на сонячний елемент не освітлювався.

Для вимірювання світлової ВАХ, керуючий сигнал від ЦАП мікроконтролера надходить до затвору польового n – канального МОН транзистора. Сонячний елемент при цьому підключено до стоку і витoku транзистора відповідно. Керуючи напругою затвор-витік, змінюється опір переходу стік – витік, а відповідно і струм, що протікає крізь сонячний елемент. Визначаючи струм та напругу в колі СЕ, можливо побудувати його ВАХ за даного рівня освітленості і температури.

Для вимірювання напруги на зразку та струму, що протікає крізь зразок, використовувався резистивний датчик INA226 [23]. Датчик вмикається в схему послідовно. Струм вимірюється як падіння напруги на шунтовому резисторі, що під'єднується до відповідних входів датчика, за допомогою вбудованого 16 бітного АЦП. В даній схемі використовується шунтовий резистор опором в 0,1 Ом, що дозволяє вимірювати струм до 800 мА з роздільною здатністю у 25 мкА. Покази датчика були відкалібровані за допомогою прецизійного вольтметра В7-46.

Освітленість вимірювалася датчиком GY-302, а температура термістором NTCLE100.

Дані про вольт-амперну характеристику до комп'ютера надходять від мікроконтролера за протоколом UART. Для візуалізації і обробки даних був розроблений інтерфейс в програмі LabVIEW, що дозволяє будувати

					<i>ДК52.4 11734.001 ПЗ</i>	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

ВАХ в реальному часі і зберігати дані у файл. Для попередньої обробки, дані виводяться також і на дворядковий цифровий дисплей.

2.2. Вибір та обґрунтування елементної бази

Вибір елементної бази продився згідно з поставленими у технічному завданні вимогами, а також з огляду на мінімальні затрати при виготовленні пристрою.

2.2.1. Вибір мікроконтролера

Основним вимогами для мікроконтролера в даній установці є наявність двухканального ЦАП, АЦП, модуля для роботи з числами з плаваючою комою (FPU), підтримка інтерфейсів SPI, I2C, UART, наявність достатньої кількості виводів.

Було обрано мікроконтролер із серії STM32F303 на базі ядра Cortex M3 та ARM архітектури. Його основними перевагами над такими аналогами як мікроконтролери від Texas Instruments серії MSP430, контролерами PIC, AVR та ін. є:

- ARM архітектура, яка є однією з найпоширеніших в промисловості, що забезпечує хорошу інтеграцію пристрою з іншими системами;
- 32 бітна розрядність мікроконтролера для більшої точності і швидкодії;
- окремий модуль для роботи з числами з плаваючою комою (FPU);
- наявність двухканального 12 бітного ЦАП;
- чотирьохканальний 12 бітний АЦП;
- підтримка до 16 таймерів (2 таймери 32 і 24 біт відповідно, інші по 16 біт);
- можливість підключення відладчика;

					<i>ДК52.4 11734.001 ПЗ</i>	<i>Адк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>23</i>

- невисока вартість.

Контролер підтримує найпоширеніші інтерфейси I2C, UART, SPI, а також містить 128 кбайт флеш пам'яті та 40 кбайт оперативної пам'яті. Даний контролер повністю задовольняє вимоги пристрою, а також має відносно невисоку вартість, тому було обрано саме його.

2.2.2. Вибір операційних підсилювачів

В схемі використано 2 прецезічні операційні підсилювачі: AD8512 та OP97. В даному пристрої, найважливішим параметром при виборі операційного підсилювача була мінімальна напруга зміщення. В схемі це особливо важливо для ОП, що керує транзистором до якого підключається СЕ, для забезпечення найменшого початкового струму.

ОП AD8512 має малу напругу зміщення - до 400 мкА [24] і його ціна є однією з найнижчих серед аналогів. В одному корпусі наявно 2 операційних підсилювачі.

OP97, крім малої напруги зміщення у 20 мкА [25] має можливість внутрішньої корекції напруги зміщення за допомогою підключення зовнішнього поділювача напруги до його виводів. У 1 корпусі міститься 1 ОП. Вартість даного ОП була однією з найнижчих серед аналогів.

2.2.3. Вибір транзисторів

В схемі струмового дзеркала та керованого опору, використовувалися польові МОН транзистори, оскільки вони є більш чутливими до керування напругою за біполярні.

В якості n та p-канальних транзисторів у струмовому дзеркалі були обрані BSH 105 та BSH 203 відповідно. Дані транзистори мають малу порогову напругу у 0,7 В, що дозволяє розширити діапазон керування струмом [26, 27]. Ціна є однією з найнижчих серед аналогів.

						<i>ДК52.4.11734.001 ПЗ</i>	<i>Адк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			24

В якості керованого опору використовувався n-канальний МОН транзистор FDD8896. Даний транзистор вибирався з огляду на найменший опір каналу у відкритому режимі. Для даного транзистора це значення складає близько 6 мОм, що є одним із найнижчих серед аналогів.

В схемі для керування реле використовувався біполярний транзистор BC817, який обирався з огляду на значення допустимої розсіювальної напруги та струму, що складає 0, 25 Вт та 500 мА. При цьому струм через транзистор не перевищуватиме 50 мА, а падіння напруги – 3 В.

2.2.4. Вибір давача струму

Для вимірювання струму в промислових умовах вирізняють 3 типи давачів: резистивні, давачі Холла та трансформаторні давачі [28]. Останні використовують для вимірювання змінного струму. Резистивні давачі є найдешевшими серед інших, при цьому вони забезпечують лінійність і точність вимірювань. Сенсори на базі ефекту Холла є менш чутливими - в середньому роздільна здатність не перевищує 1 мА.

Серед резистивних давачів, нами була обрана мікросхема INA226. Даний датчик є одним з найточніших серед аналогів, містить 16 розрядний АЦП і на виході видає оцифровані значення струму і напруги. В даній схемі використовується шунтовий резистор опором в 0,1 Ом, що дозволяє вимірювати струм до 800 мА з роздільною здатністю у 25 мкА. Покази датчика були відкалібровані за допомогою прецизійного вольтметра В7-46.

2.2.5. Вибір давача освітленості та температури

Для вимірювання освітленості було обрано датчик BH1750FV, який наявний у продажу на розпаяній платі GY-302. Він забезпечує вимірювання освітленості в діапазоні від 0 до 65535 Лк з точністю в 1 Лк і

					<i>ДК52.411734.001 ПЗ</i>	<i>Адк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		25

передає значення освітленості за інтерфейсом I2C у Люксах. Спектральна чутливість датчика відповідає спектру видимого світла. В порівнянні з спектральною чутливістю аналогічного датчика MAX44009, його характеристика є більш рівномірною. Враховуючи нижчу ціну, було обрано його.

Спектр сонячного випромінювання є дещо ширшим за видимий спектр і його значення доходять до 1500 нм, однак пік інтенсивності знаходиться саме в межах видимого спектру. В подальшому, похибку через не співпадіння спектрів можна скомпенсувати введенням поправочного коефіцієнту.

В якості давача температури використовувався термістор з від'ємним коефіцієнтом опору NTCLE100. Дані датчики є більш чутливими, а також менш інерційними і швидше реагують на зміну температури, ніж термопари. Діапазон вимірювання термопари є ширшим і доходить до тисячі градусів Цельсія, тоді як термістори здатні вимірювати температуру до кількох сотень градусів. Однак в даному пристрої діапазону вимірювання термісторів цілком достатньо. При цьому ціна термістора є значно меншою в порівнянні з термопарою.

2.3. Основні розрахунки схеми електричної принципової та симуляція її роботи

Аналогова частина схеми електричної принципової наведена на рис. 2.2. До її складу входить блок драйвера ЦАП, драйверу реле, програмованого джерела струму та керованого опору.

Драйвер ЦАП необхідний для збільшення розрядності ЦАП та компенсації напруги зміщення ЦАП.

					<i>ДК52.411734.001 ПЗ</i>	Адк.
Змн.	Адк.	№ док.	Підпис	Дата		26

Драйвер реле використовується для керування реле, яке по чергову підключає схему для вимірювання світлової чи схему для вимірювання темної ВАХ.

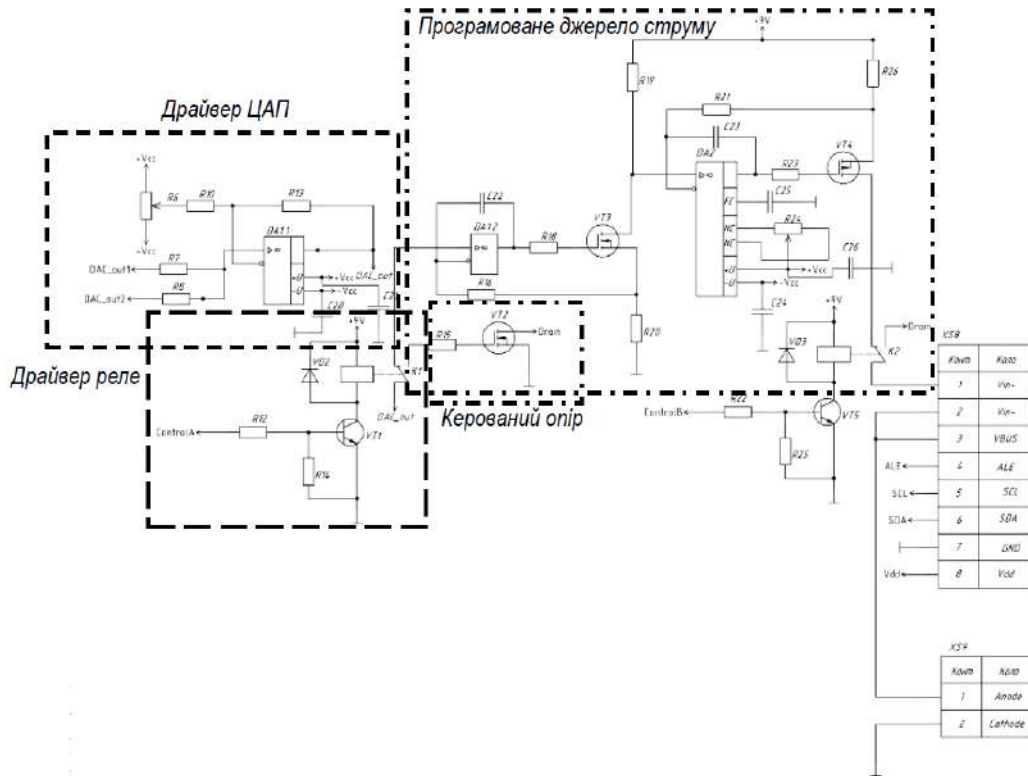


Рис. 2.2 Аналогова частина схеми електричної принципової

Програмоване джерело струму входить до складу схеми для вимірювання темної ВАХ. Задає струм через п-н перехід.

Керований опір входить до складу схеми для вимірювання світлової ВАХ.

Розглянемо кожен із вказаних блоків більш детально.

2.3.1 Драйвер ЦАП

Передбачається, що дану установку буде використано і для контролю параметрів сонячних елементів при виробництві. Для цього важливо забезпечити високу точність вимірювань. Згідно ТЗ в схемі має бути

забезпечена точність керування струмом у 1 мкА та діапазон вимірювань до 100 мА.

В мікроконтролері наявний двоканальний 12 бітний ЦАП. При використанні опорної напруги у 3 В, точність керування за напругою складає:

$$\Delta U = \frac{3}{4096} \approx 0,7 \text{ (мВ)}. \quad (2.1)$$

Для забезпечення діапазону вимірювань струму до 100 мА використовується струмозадаючий резистор R26 (рис. 2.2) у 30 Ом:

$$R = \frac{3}{0,1} = 30 \text{ (Ом)}. \quad (2.2)$$

При використанні 30 омного резистора, точність керування за струмом складає:

$$R = \frac{0,7}{30} \approx 23 \text{ (мкА)}, \quad (2.3)$$

що є меншим, ніж вказано в ТЗ.

Для збільшення точності керування напругою був задіяний 2 канал ЦАП. Для цього використана схема на базі повторювача і суматора напруги (рис. 2.3 а).

За формулою суматора напруги на резисторах маємо:

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вх1}}/R_1 + U_{\text{вх2}}/R_2}{1/R_1 + 1/R_2} = \frac{(U_{\text{вх1}}R_2 + U_{\text{вх2}}R_1)/R_1R_2}{(R_2 + R_1)/R_1R_2} = \frac{U_{\text{вх1}}R_2 + U_{\text{вх2}}R_1}{R_2 + R_1}, \quad (2.4)$$

де $U_{\text{вх1}}$ та $U_{\text{вх2}}$ – напруга на виході 1 та 2 каналів ЦАП.

В схемі використовувалися значення резисторів R1 та R2 1 кОм та 27 кОм відповідно, тоді формулу 2.1 можна переписати як:

$$U_{\text{вих}} = \frac{27 * U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}}}{28} \approx U_{\text{вх1}} + \frac{U_{\text{вх2}}}{28}. \quad (2.5)$$

Таким чином, дана схема дозволяє збільшити точність керування струмом у 28 разів до 0,82 мкА, що задовольняє ТЗ.

					ДК52.4 11734.001 ПЗ	Адк.
						28
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		

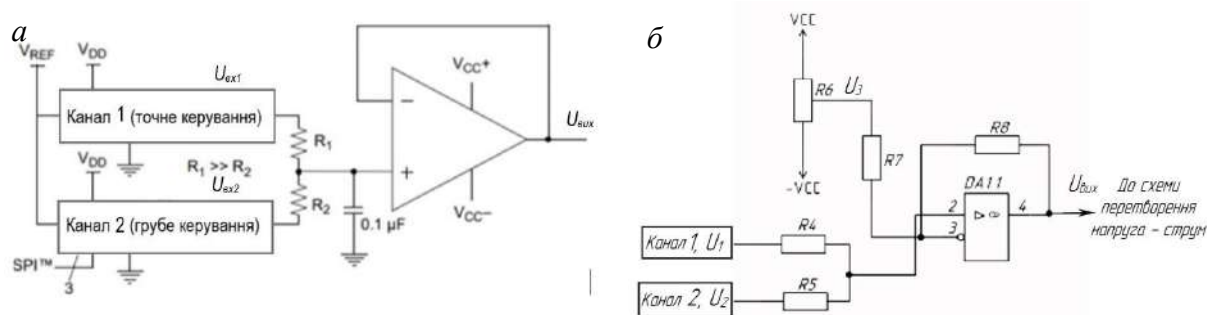


Рис. 2.3 Схема збільшення розрядності ЦАП

В схемі також передбачена компенсація похибки напруги зміщення ЦАП. Згідно документації [29] напруга зміщення для STM32F303 складає 12 LSB, що відповідає близько 8,5 мВ. Таким чином, при подачі на ЦАП коду 0x00, наприклад, на його виходах встановлюється певне мале значення напруги, до 8 мВ. В експериментальних дослідженнях, воно склало 3 мВ та 4 мВ для 1 і 2 каналів відповідно. При подачі такої напруги на схему, через зразок протікатиме струм порядку 100 мкА, що обмежує діапазон вимірювання ВАХ.

Схема на рис. 2.2 а була модифікована таким чином, щоб забезпечити компенсацію ненульової вихідної напруги (рис. 2.3, б). Вона базується на схемі інвертуючого суматора.

Вихідна напруга може бути обчислена за формулою 2.6, як це вказано в роботі [30]. Дану формулу легко отримати з використанням принципу суперпозиції.

$$U_{\text{вих}} = -U_3 \frac{R_8}{R_7} + U_1 \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_8}{R_7} + 1 \right) + U_2 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{R_8}{R_7} + 1 \right), \quad (2.6)$$

де U_3 – значення напруги після подільовача на потенціометрі R6.

Розрахуємо значення резистора R_7 . В схемі необхідно скомпенсувати напругу ΔU до 10 мВ, тоді:

$$U_3 \frac{R_8}{R_7} = \Delta U, \quad (2.7)$$

де задамося $U_3 = 12 \text{ В}$ (напруга живлення подільовача), $R_8 = 1 \text{ кОм}$.

Отже,

$$R_7 = \frac{U_3 R_8}{\Delta U} = \frac{12 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{10} = 1,2 \text{ (МОм)}. \quad (2.8)$$

Тоді, можна вважати, що:

$$\frac{R_8}{R_7} \approx 0. \quad (2.9)$$

Підставивши 2.9 у 2.6 і врахувавши, що R_1 та R_2 рівні 1 кОм та 27 кОм відповідно, маємо:

$$U_{\text{вих}} = -U_3 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} + U_1 + \frac{U_2}{28}, \quad (2.10)$$

де U_3 – значення напруги після подільовача на потенціометрі R_6 , U_1 – напруга на виході 1 каналу ЦАП, U_2 – напруга на виході 2 каналу ЦАП.

Була проведена симуляція даної схеми в середовищі LTspice (рис.2.4).

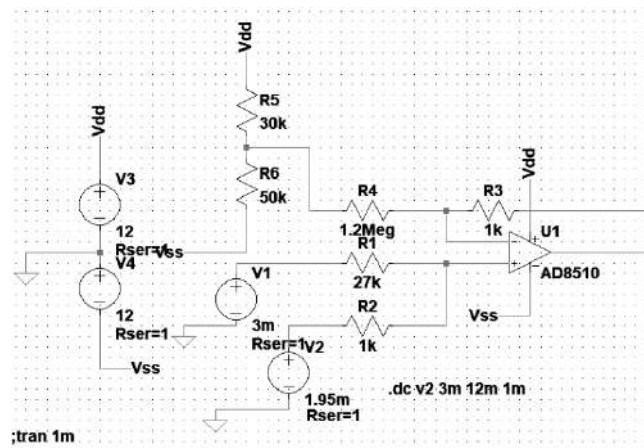


Рис. 2.4 Симуляція схеми в LTspice

Результат симуляції наведено на рис. 2.5.

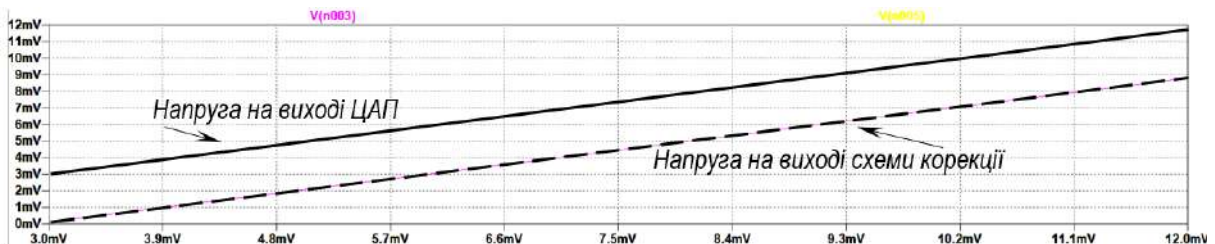


Рис. 2.5 Результат симуляції схеми

$$I = \frac{U_{10}}{R_{10}} = \frac{U_{11}}{R_{11}} = \frac{U_{13}}{R_{13}}, \quad (2.11)$$

де U_{10} – падіння напруги на резисторі R_{10} , U_{11} – падіння напруги на резисторі R_{11} , U_{13} – падіння напруги на резисторі R_{13} (рис. 2.5). При цьому падіння напруги на резисторах рівне вхідній напрузі.

Враховуючи, що R_{13} було обрано рівним 30 Ом, маємо формулу 2.12 для розрахунку струму через зразок:

$$I = \frac{U_{\text{вих}}}{30}, \quad (2.12)$$

де $U_{\text{вих}}$ розраховується за (2.10).

Було проведено симуляцію даної схеми в середовищі симуляції від Altium Designer.

Вихідна схема наведена на рис 2.7.

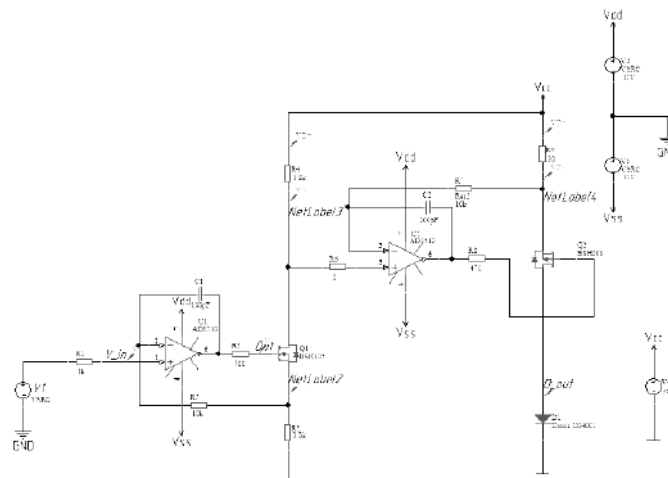


Рис.2.7 Схема керування струмом

В симуляції, вхідна напруга лінійно змінювалася від 0 до 3 В (рис. 2.8). При цьому вимірювався струм, що протікає через діод. Як видно із рис. 2.9 струм також зростає лінійно, пропорційно до напруги.

Визначимо значення струму в контрольній точці з рис. 2.9. При напрузі в 1 В, видно, що струм рівний близько 30 мА. Це збігається з теоретичними розрахунками:

2. Керування схемою перетворення напруга-струм та керованим опором здійснюється за допомогою 12 бітного ЦАП мікроконтролера. Розроблена схема для корекції початкової напруги зміщення від ЦАП і збільшення розрядності ЦАП при підключенні 2 каналу. За грубим каналом точність керування напругою складає 0,7 мВ, а за точним – 25 мкВ.

3. Схема програмованого джерела струму використовується для вимірювання темної ВАХ і базується на схемі струмового дзеркала.

4. В якості керованого опору використовується МОН транзистор FDD8896. Дана схема підключається до сонячної батареї для вимірювання її світлової ВАХ.

5. Для вимірювання струму і напруги, була обрана мікросхема INA226, що дозволяє вимірювати струм до 800 мА з точністю 25 мкА і напругу до 30 В з точністю 1,5 мВ.

6. Була проведена симуляція схеми в середовищі LTspice та Altium Designer. Результати симуляції підтверджуються теоретичними розрахунками.

					<i>ДК52.411734.001 ПЗ</i>	<i>Адк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адк.</i>	<i>№ док.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		36

Розділ 3. ПРОЕКТУВАННЯ ДРУКОВАНОГО ВУЗЛА

3.1. Вибір типу, матеріалу друкованої плати

Для виготовлення пристрою, використовувалася двошарова друкована плата. Багатошарові плати доцільно використовувати в першу чергу в складних швидкодійних пристроях для кращої завадостійкості і вищої швидкості поширення сигналу. Однак, завадостійкість можна забезпечити і в двошаровій платі при правильному проектуванні і використанні земляних полігонів. Швидкодія, яку забезпечує двостороння плата буде достатньою для розроблюваного пристрою. До того ж, двошарова плата є вигіднішою з економічної точки зору. Малосерійне виробництво двошарової плати є дешевшим, за виробництво багатошарової.

Виготовлення плати виконуватиметься на українському підприємстві. На даному підприємстві друковані плати виготовляються з матеріалу FR4-2-35-1,5 за комбінованим позитивним методом. FR4 - фольгований склотекстоліт, що є високоякісним, вогнетривким матеріалом має низьку гігроскопічність. При цьому ціна на нього є відносно невисокою. В порівнянні з гетинаксом, є більш придатним до обробки. Товщина плати - 1,5 мм, при цьому вона облицьована з двох зовнішніх сторін шаром мідної фольги товщиною 35 мкм.

3.2. Вибір класу точності плати та основного кроку координатної сітки

За основний крок координатної сітки було обрано 0,1 мм, за додатковий - 0,635 мм. Даний вибір ґрунтується на тому, що в схемі присутні мікросхеми з кроком між виводами у міліметрах, як, наприклад, STM32F303, у якої відстань між виводами складає 0,5 мм та мікросхеми з

					ДК52.411734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

відстанню між выводами у дюймах, наприклад, ОР97, в якій відстань між выводами складає 1,27 мм.

Клас точності плати вибирався згідно ГОСТ 23571-86, згідно якого виділяють 5 класів точності. Порівняння номінальних значень основних розмірів наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Номінальне значення розмірів для класів точності

Параметр	Номінальне значення основних розмірів для класу точності				
	1	2	3	4	5
b , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
S , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
b_{no}	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025
K_{dm}	0,4	0,4	0,33	0,25	0,2

В даній таблиці, b – ширина друкованого провідника, S – відстань між краями сусідніх елементів, b_{no} – гарантований поясок, K_{dm} – відношення номінального значення діаметра найменшого з металізованих отворів до товщини друкованої плати.

Перший та другий класи точності доцільний при малій щільності розміщення дискретних компонентів і мікросхем. Третій клас використовують в основному для мікросхем із штирьовими выводами. Для поверхневого монтажу обирають зазвичай 4 або 5 клас точності [33 Shahnov].

Клас точності вибирався з огляду на обмеження за відстанню між краями сусідніх елементів. Найменшим воно є для мікросхеми STM32F303CB, що виготовляється в корпусі LQFP48. В даному корпусі відстань між контактними майданчиками становить 0,2 мм. Отже, згідно даних в таблиці 3.1, плата має бути виготовлена за 4 класом точності.

Фото виготовленої друкованої плати наведено на рис. 3.1.

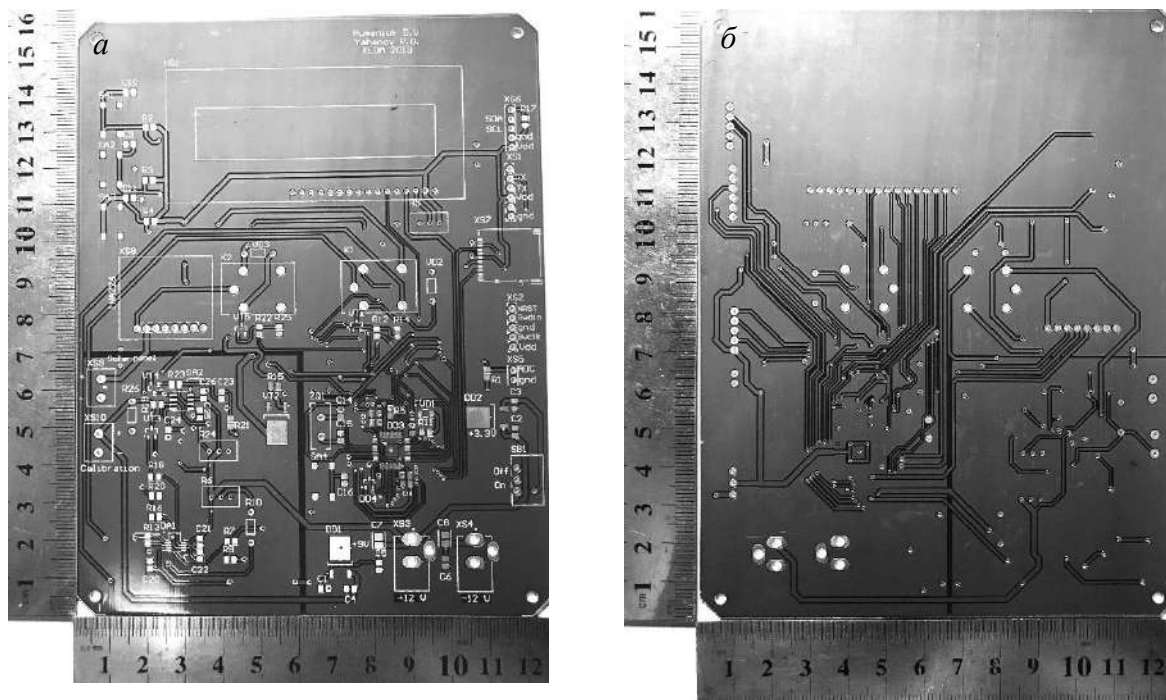


Рис. 3.1 Фото виготовленої друкованої плати, а – вид зверху, б – вид знизу

3.3. Розміщення компонентів та розводка друкованої плати

Розміщення компонентів на друкованій платі виконувалося з огляду на найменшу довжину з'єднань, які необхідно буде виконати при розведенні доріжок. При цьому щільність розміщення має бути такою, щоб можливо було виконати трасування за обраним класом точності.

Схематичне зображення розміщених на платі компонентів наведено на рис. 3.2.

Для живлення схеми необхідно подати напругу +12 В і -12 В. Роз'єми для підключення живлення XS3 та XS4 розташовані в нижній частині плати. Біля них розташовані мікросхеми для стабілізації напруги DD1 та DD2.

Мікроконтролер розміщувався в центральній частині вузлу, оскільки саме цей компонент має найбільшу кількість з'єднань із іншими. В правій частині плати були розміщені роз'єми XS5 для під'єднання датчика температури, XS2 із выводами для програмування мікроконтролера, XS7

для під'єднання сімкарти, XS1 для під'єднання перетворювача UART-USB, XS6 – для датчика освітленості.

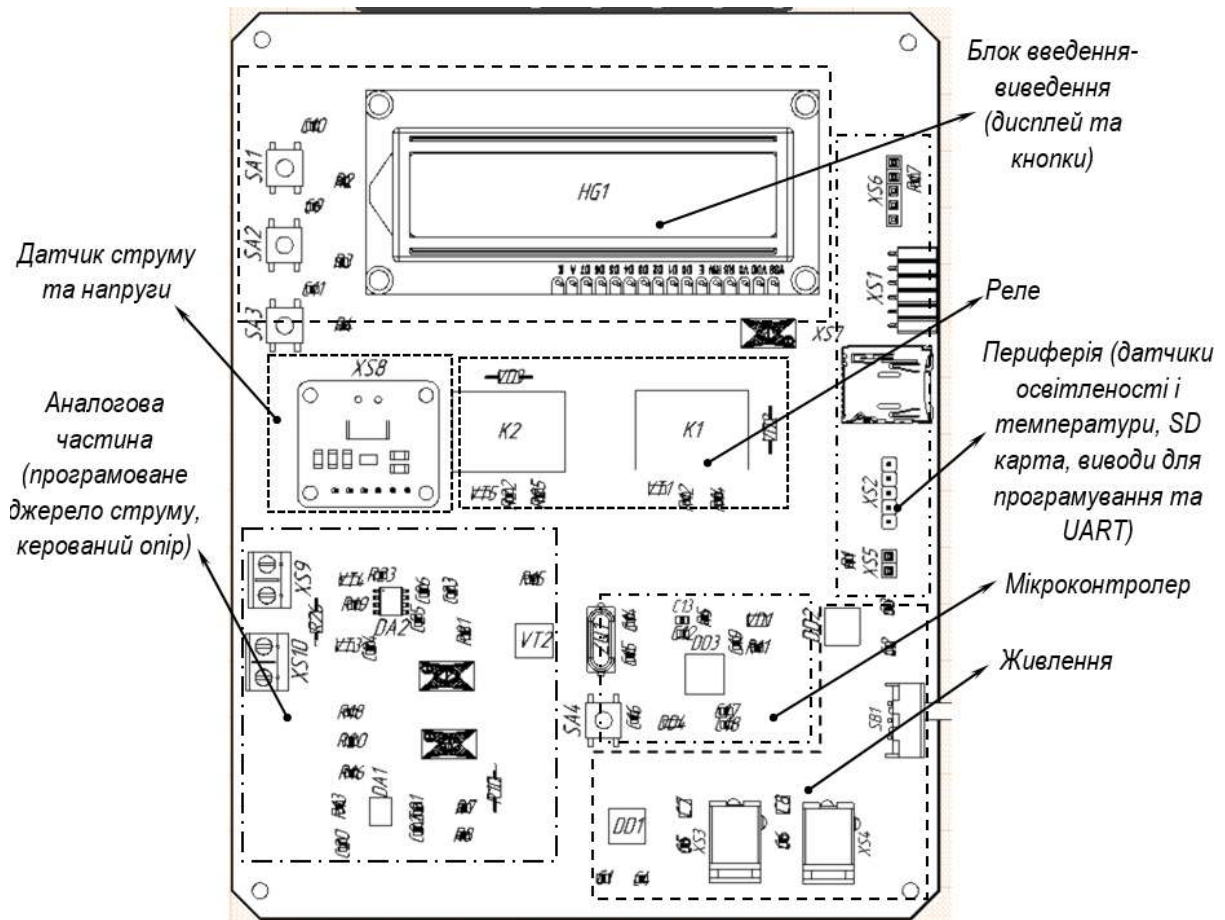


Рис. 3.2 Розміщення компонентів на друкованій платі

В схемі було передбачено окрему ділянку для аналогової частини, яка включає в себе програмоване джерело струму і керований опір. Для зменшення завад, передбачено окрему землю для цієї частини і решти схеми. При розводці, землі з'єднувалися в одній точці, ближче до джерела живлення. Також, важливо було розмістити роз'єм для датчика струм і напруги XS8, якнайближче до клем для під'єднання сонячного елемента XS9 для забезпечення більшої точності вимірювань. Клема XS10 використовується для під'єднання прицевійного вимірювача напруги для калібрування давача INA226.

Усі інші компоненти розміщувалися на вільних місцях друкованої плати. Конденсатори для згладжування завад за живленням, розташовувалися якнайближче до виводів мікросхем.

Проектування друкованої плати виконувалося у системі автоматизованого проектування (САПР) Altium Designer.

Висновки до розділу 3.

1. Плата виготовлятиметься з матеріалу FR4-2-35-1,5 за комбінованим позитивним методом.

2. За основний крок координатної сітки було обрано 0,1 мм, за додатковий - 0,635 мм. Плата виготовляється за 4 класом точності.

3. Мікроконтролер розміщувався в центральній частині вузлу. В схемі було виділено окрему ділянку для аналогової частини, яка включає в себе програмоване джерело струму і керований опір. Давач струму і напруги розміщується якнайближче до клем для під'єднання сонячного елемента. Передбачено клеми для під'єднання прицезійного вольтметра для калібрування давача струму і напруги.

					<i>ДК52.411734.001 ПЗ</i>	<i>Адк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		41

Розділ 4. РОЗРАХУНКИ, ЯКІ ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАВИЛЬНІСТЬ КОНСТРУКТОРСЬКИХ РІШЕНЬ

4.1 Виконання конструкторсько-технологічного розрахунку елементів друкованого монтажу

4.1.1 Визначення мінімальної ширини провідника для ланцюгів живлення

Розрахуємо мінімальну ширину друкованого провідника ланцюгів живлення і землі за формулою (4.1).

$$b_{minI} = \frac{I_{max}}{j_{доп} \cdot t_{пров}}, \quad (4.1)$$

де I_{max} – максимально можливий струм у ланцюгу, $j_{доп}$ – допустима щільність струму друкованого провідника, що виготовлений комбінованим позитивним методом, $j_{доп} = 4.8 \text{ А/мм}^2$, $t_{пров}$ – товщина друкованого провідника, що визначається виразом (4.2).

$$t_{пров} = h_{\phi} + h_{ГМ} + h_{ХМ}, \quad (4.2)$$

де h_{ϕ} – товщина фольги матеріалу, $h_{\phi} = 0,035 \text{ мм}$, $h_{ГМ}$ – товщина гальванічно осадженої міді $h_{ГМ} = 0,055 \text{ мм}$, $h_{ХМ}$ – товщина шару хімічно осадженої міді $h_{ХМ} = 0,0065 \text{ мм}$. Тоді:

$$t_{пров} = 0,035 + 0,055 + 0,0065 = 0,097 \text{ (мм)}.$$

Значення струму, споживаного активними елементами схеми наведені в таблиці 4.1. В результаті,

$$I_{max} = 20 + 4 + 0,5 + 0,5 + 1 + 0,8 + 0,1 + 100 = 123 \text{ (мА)}.$$

Отже, мінімальна ширина друкованого провідника на постійному струмі для ланцюгів живлення і землі:

$$b_{minI} = \frac{I_{max}}{j_{доп} \cdot t_{пров}} = \frac{123 \cdot 10^{-3}}{4,8 \cdot 0,097} = 0,264 \text{ (мм)}.$$

					ДК52.4 11734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Для забезпечення кращої завадостійкості, провідники живлення робилися товщини порядку 0.8 мм.

Таблиця 4.1 - Струми споживані активними елементами

IC	Кількість IC	I _{спожив} , mA
STM32F303CB	1	20
AD8512	1	4
OP97	1	0,5
INA226	1	0,5
KF33BDT	1	1
L7809	1	0,8
REF30330	1	0,1
162A Displaytech	1	100

4.1.2 Визначення мінімальної ширини провідника з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому

Мінімальна ширина провідника з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому визначається виразом (4.3).

$$b_{minU} = \frac{\rho * I_{max} * L_{пров}}{t_{пров} * U_{доп}}, \quad (4.3)$$

де ρ - питомий опір провідника, виготовленого комбінованим позитивним методом, $\rho=0.0175$ (Ом·мм²/м), $L_{пров}$ – довжина найдовшого друкованого провідника на друкованій платі, $L_{пров}=0.4$ (м), $U_{доп}$ – допустиме падіння напруги на друкованому провіднику:

$$U_{доп}=0.05 \cdot U_{жив}=0.05 \cdot 3,3=0,165 \text{ (В)}.$$

Отже,

$$b_{minU} = \frac{\rho * I_{max} * L_{пров}}{t_{пров} * U_{доп}} = \frac{0.0175 * 123 * 10^{-3} * 0.4}{0.097 * 0.165} = 53,8 \cdot 10^{-3} \text{ (мм)},$$

що є меншим за мінімальну товщину провідника, використану в схемі - 0,15 мм.

4.1.3 Визначення номінального діаметру монтажного отвору

Номінальний діаметр монтажного отвору визначається за (4.4).

$$d \geq d_{\text{ве}} + \Delta d_{\text{мо}} + r, \quad (4.4)$$

де $d_{\text{ве}}$ - діаметр виводу елемента, для якого визначається діаметр монтажного, $\Delta d_{\text{мо}}$ - нижнє граничне відхилення від номінального діаметру МО, $\Delta d_{\text{мо}} = 0.1$ мм, r - різниця між мінімальним діаметром МО та максимальним діаметром виводу елемента $r = 0.1..0.2$ мм.

Діаметр контактів роз'єму для під'єднання зразка до схеми, роз'ємів для під'єднання датчиків та виводів для програмування складає $d_{\text{pld}} = 1$ мм.

Діаметр контактів для живлення складає $d_{\text{suppl}} = 2,5$ мм.

Діаметр отворів для резисторів, потенціометрів, тактового генератора $d_{\text{res}} = 0,8$ мм.

Отже,

$$d_{\text{pld}} \geq 1 + 0,2 + 0,1 = 1,3 \text{ (мм)};$$

$$d_{\text{suppl}} \geq 2,5 + 0,2 + 0,1 = 2,8 \text{ (мм)};$$

$$d_{\text{res}} \geq 0,8 + 0,2 + 0,1 = 1,1 \text{ (мм)}.$$

Діаметр контактного майданчика обчислюється за (4.5).

$$D_{\text{min}} = D_{\text{min1}} + 1.5h_{\phi} + 0.03, \quad (4.5)$$

де D_{min1} - мінімальний ефективний діаметр контактного майданчика, h_{ϕ} - товщина фольги. Даний параметр обчислюється за (4.6).

$$D_{\text{min1}} = 2 \left(b_{\text{по}} + \frac{d_{\text{max}}}{2} + \delta_o + \delta_{\text{км}} \right), \quad (4.6)$$

де d_{max} - максимальний діаметр просвердленого отвору в ДП, $b_{\text{по}} = 0.1$ мм - ширина пояска КМ, $\delta_o = 0.07$ мм - похибка розташування центру отвору відносно вузла КС, $\delta_{\text{км}} = 0.05$ мм - похибка розташування центру КМ відносно вузлу КС.

Максимальний діаметр просвердленого отвору ДП знайдемо за (4.7).

$$d_{\text{max}} = d + \Delta d + (0,1 \dots 0,15). \quad (4.7)$$

					ДК52.4 11734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Отже, максимальний діаметр для контактів роз'єму для під'єднання зразка до схеми, роз'ємів для під'єднання датчиків та виводів для програмування складає:

$$d_{max} = d_{pld} + \Delta d + (0,1 \dots 0,15) = 1,3 + 0,05 + 0,1 = 1,45 \text{ (мм)};$$

$$D_{min1} = 2 \left(b_{по} + \frac{d_{max}}{2} + \delta_o + \delta_{км} \right) = 2 \left(0,1 + \frac{1,45}{2} + 0,07 + 0,05 \right) = 1,89 \text{ (мм)};$$

$$D_{min} = D_{min1} + 1,5h_{\phi} + 0,03 = 1,89 + 1,5 * 0,035 + 0,03 = 1,97 \text{ (мм)};$$

$$D_{max} = D_{min} + 0,02 = 1,97 + 0,02 = 2 \text{ (мм)}.$$

Для контактів для живлення діаметр контактного майданчика складає:

$$d_{max} = d_{suppl} + \Delta d + (0,1 \dots 0,15) = 2,8 + 0,05 + 0,1 = 2,95 \text{ (мм)};$$

$$D_{min1} = 2 \left(b_{по} + \frac{d_{max}}{2} + \delta_o + \delta_{км} \right) = 2 \left(0,1 + \frac{2,95}{2} + 0,07 + 0,05 \right) = 3,39 \text{ (мм)};$$

$$D_{min} = D_{min1} + 1,5h_{\phi} + 0,03 = 3,39 + 1,5 * 0,035 + 0,03 = 3,47 \text{ (мм)};$$

$$D_{max} = D_{min} + 0,02 = 3,47 + 0,02 = 3,49 \text{ (мм)}.$$

Для отворів для резисторів, потенціометрів, тактового генератора діаметр контактного майданчика складає:

$$d_{max} = d_{pld} + \Delta d + (0,1 \dots 0,15) = 1,1 + 0,05 + 0,1 = 1,25 \text{ (мм)};$$

$$D_{min1} = 2 \left(b_{по} + \frac{d_{max}}{2} + \delta_o + \delta_{км} \right) = 2 \left(0,1 + \frac{1,25}{2} + 0,07 + 0,05 \right) = 1,69 \text{ (мм)};$$

$$D_{min} = D_{min1} + 1,5h_{\phi} + 0,03 = 1,69 + 1,5 * 0,035 + 0,03 = 1,77 \text{ (мм)};$$

$$D_{max} = D_{min} + 0,02 = 1,77 + 0,02 = 1,79 \text{ (мм)}.$$

4.1.4 Визначення мінімальної ширини провідника

Мінімальна ширина провідника обчислюється за (4.8).

$$b_{min} = b_{пр}^r + 1,5 * h_{\phi} + 0,03, \quad (4.8)$$

де $b_{пр}^r$ – мінімальна ширина провідника для обраного класу точності – в нашому випадку $b_{пр}^r = 0,15$ мм. Отже,

$$b_{min} = b_{пр}^r + 1,5 * h_{\phi} + 0,03 = 0,15 + 1,5 * 0,035 + 0,03 = 0,23 \text{ (мм)}.$$

					ДК52.4 11734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Тоді максимальна ширина провідника

$$b_{max} = b_{min} + 0.02 = 0,23 + 0,02 = 0,25 \text{ (мм)}.$$

4.1.5 Визначення відстані між провідником і контактним майданчиком

Мінімальної відстань між провідником та контактним майданчиком визначається (4.9).

$$l_{ПКМ min} = L_0 - \left(\frac{D_{max}}{2} + \delta_{км} + \frac{b_{max}}{2} + \delta_{сп} \right), \quad (4.9)$$

де $L_0 = 1.28$ мм (що є найгіршим випадком) – відстань між центрами отвору та друкованого провідника, що є кратним кроку КС, $\delta_{сп} = 0,05$ мм - похибка, що враховує зміщення провідника, $\delta_{км} = 0,05$ мм - похибка розташування контактного майданчика, $D_{max} = 2$ мм – максимальний діаметр КМ.

$$l_{ПКМ min} = L_0 - \left(\frac{D_{max}}{2} + \delta_{км} + \frac{b_{max}}{2} + \delta_{сп} \right) = 1,28 - \left(\frac{2}{2} + 0,05 + \frac{0,25}{2} + 0,05 \right) = 1,128 - 1,225 = 0,05 \text{ (мм)}.$$

Відповідно до 4 класу точності, оберемо мінімальну відстань між провідником і контактним майданчиком рівну 0,15 мм.

4.1.6 Визначення мінімальної відстані між краями двох сусідніх провідників

Мінімальна відстань між краями двох сусідніх провідників обчислюється за (4.10).

$$l_{ПП min} = L_0 - (b_{max} + 2\delta_{сп}), \quad (4.10)$$

де L_0 оберемо рівну 0,5 мм, як найменша відстань між контактами у мікросхемі мікроконтролера.

$$l_{ПП min} = 0,5 - (0,25 + 2 \cdot 0,05) = 0,15 \text{ (мм)},$$

що задовольняє 4 клас точності.

					ДК52.4 11734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

4.1.7 Визначення мінімальної відстані між контактними майданчиками

Мінімальну відстань між двома контактними майданчиками знайдемо за (4.11).

$$L_{KM\ min} = L_0 - (D_{max} + 2\delta_{км}), \quad (4.11)$$

де $L_0 = 2,5$ мм – відстань між центрами сусідніх КМ.

$$l_{KM\ min} = L_0 - (D_{max} + 2\delta_{км}) = 2,5 - (2 + 2 \cdot 0,05) = 0,4 \text{ (мм)},$$

що задовольняє 4 клас точності.

4.2 Електричний розрахунок друкованої плати

4.2.1 Визначення падіння напруги на найдовшому провіднику

Падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику визначимо за формулою (5.1).

$$U_{пад} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot l_{пр}}{b_{пр} \cdot t_{пр}}, \quad (4.12)$$

де ρ - питомий опір провідника, виготовленого комбінованим позитивним методом, $\rho = 0,0175$ Ом·мм²/м, $l_{пр}$ – довжина найдовшого друкованого провідника на друкованій платі $l_{пр} = 0,4$ м, $b_{пр} = 0,35$ мм – максимальна товщина провідника, $I_{max} = 120$ мА – струм в провіднику, $t_{пров}$ – товщина друкованого провідника. Отже,

$$U_{пад} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot l_{пр}}{b_{пр} \cdot t_{пр}} = \frac{0,0175 \cdot 120 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4}{0,35 \cdot 0,097} = 24,7 \text{ мВ.}$$

Отриманий результат не перевищує норми у 5% від напруги живлення у 3,3 В: 0,16 В.

4.2.2 Потужність втрат друкованої плати

Потужність втрат друкованої плати знайдемо відповідно до (4.13).

$$P_{ном} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot E^2 \cdot \text{tg}\sigma, \quad (4.13)$$

									ДК52.4 11734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата						47

де $f=1$ Гц, бо ведемо розрахунок на постійному струмі.

$tg\sigma$ знайдемо за (4.14).

$$tg\sigma = \frac{\varepsilon_{лаку} \cdot h_{матеріал_дп} \cdot tg\sigma_{матеріал_дп} + 2 \cdot \varepsilon_{матеріал_дп} \cdot h_{шар_лаку} \cdot tg\sigma_{лаку}}{2 \cdot \varepsilon_{матеріал_дп} \cdot h_{шар_лаку} + \varepsilon_{лаку} \cdot h_{матеріал_дп}}, \quad (4.14)$$

де $h_{шар\ лаку}$ – товщина одного шару лаку (5 мкм), $\varepsilon_{матеріал_дп}$ – діелектрична проникність матеріалу ДП (4,5 для FR-4), $\varepsilon_{лаку}$ – діелектрична проникність лаку (4,5 для УР-231), $tg\sigma_{лаку}$ – тангенс кута діелектричних втрат лаку (0,03), $h_{матеріал_дп}$ – товщина матеріалу ДП (1,5 мм), $tg\sigma_{матеріал_дп} = 0,002$.

$$tg\sigma = \frac{4,5 \cdot 0,001 \cdot 0,002 + 2 \cdot 4,5 \cdot 0,000015 \cdot 0,03}{2 \cdot 4,5 \cdot 0,000005 + 4,5 \cdot 0,001} = 0,0029.$$

C – ємність друкованої плати. Знайдемо ємність за (4.15).

$$C = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot \varepsilon \cdot S_m}{h}, \quad (4.15)$$

де $\varepsilon=4,5$ – діелектрична проникність FR4, $S_m=17000 \text{ мм}^2=0,017 \text{ м}^2$ – площа металізації, $h=1,5 \text{ мм}$ – товщина друкованої плати.

$$C = \frac{0,009 \cdot \varepsilon \cdot S_m}{h} = \frac{9 \cdot 10^{-9} \cdot 4,5 \cdot 0,017}{1,5} = 0,45 \text{ (нФ)}.$$

$$P_{пот} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot E^2 \cdot tg\sigma = 2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 0,45 \cdot 10^{-9} \cdot 9^2 \cdot 0,0029 = 0,66 \text{ (нВт)}.$$

4.2.3 Найбільша ємність між двома провідниками

Найбільшу ємність між двома сусідніми провідниками знайдемо за (4.16).

$$C = 0,12 \cdot \varepsilon \cdot l_{пр} \cdot \left(lg \frac{2 \cdot S}{b_{пр} + t_{пр}} \right)^{-1}, \quad (4.16)$$

де $S = 0,8 \text{ мм}$ – відстань двома обраними провідниками, $b_{пр} = 0,3 \text{ мм}$ – ширина друкованого провідника, $t_{пр} = 0,035 \text{ мм}$ – товщина друкованих провідників, $l_{пр} = 56,6 \text{ мм}$ – довжина взаємного перекриття двох паралельних провідників. ε знайдемо за формулою (4.17) із врахуванням лакового покриття.

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\text{матеріал_дп}} \cdot \varepsilon_{\text{лаку}} \cdot (h_{\text{матеріал_дп}} + 2h_{\text{шарлаку}})}{h_{\text{матеріал_дп}} \cdot \varepsilon_{\text{лаку}} + 2h_{\text{шарлаку}} \cdot \varepsilon_{\text{матеріал_дп}}}, \quad (4.17)$$

де: $h_{\text{шарлаку}}$ – товщина одного шару лаку (5 мкм), $\varepsilon_{\text{лаку}}$ – діелектрична проникність лаку УР-231, $\varepsilon_{\text{лаку}} = 4,5$, $h_{\text{матеріал_дп}}$ – товщина плати, $h_{\text{матеріал_дп}} = 0,001$ м, $\varepsilon_{\text{матеріал_дп}}$ – діелектрична проникність матеріалу плати, $\varepsilon_{\text{матеріал_дп}} = 4,5$.

$$\varepsilon = \frac{4,5 \cdot 4,5 \cdot (0,001 + 2 \cdot 3 \cdot 0,000005)}{0,0015 \cdot 4,5 + 2 \cdot 0,000005 \cdot 4,5} = 3.$$

$$C = 0,12 \cdot \varepsilon \cdot l_{\text{пр}} \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot S}{b_{\text{пр}} + t_{\text{пр}}} \right)^{-1} = 0,12 \cdot 3 \cdot 56,6 \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot 0,8}{0,3 + 0,035} \right)^{-1} = 18,75 \text{ (пФ)}.$$

4.2.4 Найбільша індуктивність між двома провідниками

Найбільшу взаємну індуктивність двох паралельних друкованих провідників знайдемо за (4.18).

$$M = 0,02 \cdot \left(l_{\text{пр}} \cdot \lg \frac{\sqrt{l_{\text{пр}}^2 + L_0^2} + l_{\text{пр}}}{L_0} - \sqrt{l_{\text{пр}}^2 + L_0^2} + L_0 \right), \quad (4.18)$$

де $l_{\text{пр}} = 5,6$ см – довжина взаємного перекриття двох паралельних провідників, $L_0 = 0,03$ см – відстань між вісьовими лініями двох паралельних провідників.

Тоді

$$\begin{aligned} M &= 0,02 \cdot \left(l_{\text{пр}} \cdot \lg \frac{\sqrt{l_{\text{пр}}^2 + L_0^2} + l_{\text{пр}}}{L_0} - \sqrt{l_{\text{пр}}^2 + L_0^2} + L_0 \right) = \\ &= 0,02 \cdot \left(2,1 \cdot \lg \frac{\sqrt{2,1^2 + 0,05^2} + 2,1}{0,05} - \sqrt{2,1^2 + 0,05^2} + 0,05 \right) \\ &= 0,04 \text{ (нГн)}. \end{aligned}$$

4.3 Розрахунок надійності друкованого вузла

У даній роботі оцінка надійності проводилася за показником безвідмовної роботи приладу.

Інтенсивність відмов для окремої групи елементів знаходимо за формулою 4.19.

$$\lambda_e = \lambda_0 * \prod_i K_i = \lambda_e = \lambda_0 * k_1 * k_2 * k_3 * k_n. \quad (4.19)$$

де λ_0 - базова інтенсивність відмов, K_i - коефіцієнти, що враховують зміну інтенсивності відмов в залежності від певних факторів, а саме: k_1 – поправочний коефіцієнт в залежності від дії механічних факторів, k_2 – поправочний коефіцієнт в залежності від дії вологи і температури, k_3 – поправочний коефіцієнт в залежності від атмосферного тиску, k_n – коефіцієнт навантаження.

Коефіцієнти λ_0 , k_1 , k_2 , k_3 були отримані із джерела [33]. Нижче наведено розрахунок коефіцієнта навантаження для основних елементів схеми.

1) Резистори.

Для резисторів K_n визначається за розсіювальною потужністю. Розглянемо, для прикладу, розрахунок для резисторів R1-R5 ($R = 10 \text{ кОм}$, $P = 0.125 \text{ Вт}$, $U = 3 \text{ В}$).

$$K_n = \frac{U^2}{R * P_{\text{ном}}} = \frac{3^2}{10000 * 0,1} = 0,009.$$

Аналогічно виконаємо розрахунок для решти резисторів. Результат обчислень наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Коефіцієнти навантаження резисторів

Елемент	Характеристики	K_H
R1-R5	0805 0.125 Вт 10 кОм 5% Yageo	0,009
R6	Through hole 0.5 Вт 100 кОм 5% SR Passives	0,0009
R7	0805 0.125 Вт 100 Ом 5% Yageo	0,9
R8	0805 0.125 Вт 100 кОм 5% Yageo	0,009
R9	Through hole 0.5 Вт 1 кОм 5% SR Passives	0,09
R10	Through hole 0.25 Вт 2 МОм 5% Yageo	0,00002
R11	0805 0.125 Вт 220 Ом 1% Yageo	0,4
R12	0805 0.125 Вт 10 кОм 5% Yageo	0,009
R13	0805 0.125 Вт 1 кОм 5% Yageo	0,09
R14	0805 0.125 Вт 10 кОм 5% Yageo	0,009
R15	0805 0.125 Вт 500 Ом 5% Yageo	0,18
R16,R17	0805 0.125 Вт 10 кОм 5% Yageo	0,09
R18	0805 0.125 Вт 500 Ом 5% Yageo	0,18
R19,R20	0805 0.125 Вт 1.8 кОм 1% Yageo	0,05
R21,R22	0805 0.125 Вт 10 кОм 5% Yageo	0,009
R23	0805 0.125 Вт 500 Ом 5% Yageo	0,18
R24	Through hole 0.5 Вт 100 кОм 5% SR Passives	0,0009
R25	0805 0.125 Вт 10 кОм 5% Yageo	0,009
R26	Through hole 0.5 Вт 30 Ом 1% Yageo	0,6

2) Конденсаторів.

Для конденсаторів коефіцієнт навантаження визначається за формулою:

$$K_H = \frac{U_{\text{роб}}}{U_{\text{ном}}} \quad (2.20)$$

Вихідні дані для розрахунку інтенсивності відмов наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Дані для розрахунку інтенсивності відмов

Компонент	Кількість	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, \text{год}^{-1}$	k_H	$N * \lambda_0 \cdot 10^{-8}$ $*k_H * k_1 * k_2 * k_3$
R1-R5	5	0,03	0,009	0,00135
R6	1	0,045	0,0009	4,05E-05
R7	1	0,03	0,9	0,027
R8	1	0,03	0,009	0,00027
R9	1	0,045	0,09	0,00405
R10	1	0,03	0,00002	6E-07
R11	1	0,03	0,4	0,012
R12	1	0,03	0,009	0,00027
R13	1	0,03	0,09	0,0027
R14	1	0,03	0,009	0,00027
R15	1	0,03	0,18	0,024
R16,R17	2	0,03	0,09	0,0054
R18	1	0,03	0,18	0,0054
R19,R20	2	0,03	0,05	0,003
R21,R22	2	0,03	0,009	0,00054
R23	1	0,03	0,18	0,024
R24	1	0,045	0,0009	4,05E-05
R25	1	0,03	0,009	0,00027
R26	1	0,045	0,6	0,027
C1,C2	2	0,15	0,24	0,072
C3,C4	2	0,15	0,24	0,072
C5,C6	2	0,15	0,24	0,072

Таблиця 4.3 - продовження

<i>C7,C8</i>	2	0,035	0,75	0,0525
<i>C9-C13</i>	5	0,15	0,066	0,0495
<i>C14,C15</i>	2	0,15	0,066	0,0198
<i>C16,C17</i>	2	0,15	0,24	0,072
<i>C18</i>	1	0,15	0,66,	0,099
<i>C19-C22</i>	4	0,15	0,24	0,144
<i>C23</i>	1	0,15	0,24	0,036
<i>C24</i>	1	0,15	0,24	0,036
<i>C25</i>	1	0,15	0,66	0,099
<i>C26</i>	1	0,15	0,24	0,036
<i>Мікросхеми</i>	6	0,013	1	0,078
<i>Транзистори польові</i>	3	0,5	1	1,5
<i>Транзистори біполярні</i>	2	0,7	1	1,4
<i>Діоди</i>	2	0,2	1	0,4
<i>Контакти роз'єму</i>	40	0,07	1	2,8
<i>Резонатор</i>	1	0,04	1	0,04
<i>Реле</i>	2	0,25	1	0,5
<i>Дисплей</i>	1	0,88	1	0,88
<i>Друкована плата</i>	2	0,7	1	1,4
<i>Пайка виводів</i>	302	0,0005	1	0,151
<i>Перехідні отвори</i>	152	0,000375	1	0,057
<i>Сумарна інтенсивність відмов друкованого вузла</i>				$10,2 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$

Отже, загальна експлуатаційна інтенсивність відмов складає:

$$\lambda_3 = \sum \lambda_i = 10,2 \cdot 10^{-6} \text{ (год}^{-1}\text{)}$$

2. Знайдемо наробіток до відмови.

$$T_0 = 1/\lambda_3 = 10^6/10,2 = 98\,039,2 \text{ (год)}$$

3. Вірогідність безвідмовної роботи за 1 рік $t_p = 8760$ год

$$P_M(t_p) = e^{\frac{-t_p}{T_0}} = e^{\frac{-8760}{98039}} = 0,914.$$

Ймовірність відмови протягом року:

$$Q_M = 1 - P_M = 0.086.$$

4. Визначаємо ресурс нашого виробу:

$$P(t) = Q(t) = 0.5 = e^{-10,2 \cdot 10^{-6} t}, \quad (2.21)$$

звідки $t \approx 68000$ (год), що відповідає 7,5 рокам.

5. Побудуємо графік залежності вірогідності безвідмовної роботи $P(t)$ від часу та графік вірогідності відмови $Q(t)$ від часу (рис. 4.1).

$$P(t) = e^{\frac{-t}{98\,039}}. \quad (2.22)$$

$$Q(t) = 1 - e^{\frac{-t}{98\,039}}. \quad (2.23)$$

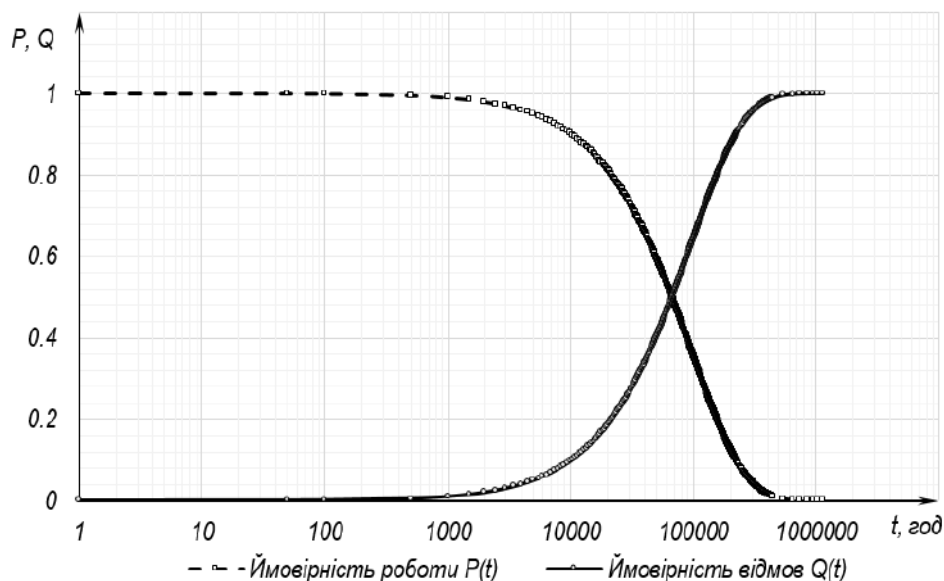


Рис. 4.1 Графік залежності ймовірності відмов та безвідмовної роботи

4.4 Розрахунок віброміцності вузла

Закріплення плати – спирання на 4 сторони.

Матеріал плати – склотекстоліт.

- часовий опір: $\sigma t = 105 \text{ Мпа}$;
- модуль Юнга: $E = 30,2 * 10^3 \text{ Мпа}$;
- коефіцієнт Пуассона: $\mu = 0,25$;
- показник затухання: $\varepsilon = 0,06$;
- густина: $\rho = 2,05 \text{ г/см}^3 = 2050 \text{ кг/м}^3$;
- питома густина: $\nu = 2,05 * 10^4 \text{ Н/м}^3$;
- коефіцієнт запасу міцності: $n_I = 2$;

Коефіцієнт перевантаження: $n = 10$;

Частота вібрацій; 5-300 Гц з кроком 5 Гц;

Розміри друкованої плати: $a \times b \times h = 125 \times 160 \times 1,5 \text{ мм}$.

Кількість елементів на платі та їх маса наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Загальна кількість та маса елементів

Елемент	Позначення	Кількість	Маса, г	Загальна маса, г
Конденсатори	0805 – X5R	24	0,05	1,2
	SMD-B	2	0,06	0,12
Мікросхеми	AD8510	1	0,07	0,07
	OP97	1	0,07	0,07
	L7809	1	1,5	1,5
	KF33BDT	1	1,5	1,5
	STM32F303	1	0,187	0,187
	REF3030	1	0,1	0,1
Резистори	0805	23	0,05	1,15
	Виводні	2	0,12	0,24
Потенціометри		2	2,5	5

ДК52.4 11734.001 ПЗ

Адк.

56

Таблиця 4.4 - продовження

Діоди		3	0,12	0,36
Кнопка	DSTM-61	3	1	3
Перемикач	SK12	1	2	2
Транзистори	BSH105	1	0,1	0,1
	BSH203	1	0,1	0,1
	FDD88	1	1,5	1,5
	BC817	2	0,1	0,2
Резонатор		1	0,1	0,1
Реле		2	6	12
Роз'єми	PLS-8	1	0,6	0,6
	PBS-6	1	0,45	0,45
	PBS-5	1	0,375	0,375
	PBS-3	1	0,225	0,225
	PLS-16	1	1,2	1,2
	Term. block	2	1,5	3
<i>Загальна маса елементів, г</i>				36,347

1. Вираховуємо загальну масу елементів

$$m_e = 36,347 \text{ (г)};$$

та масу плати

$$m_n = V \cdot \rho = 125 \cdot 160 \cdot 1,5 \cdot 2050 \cdot 10^{-9} = 0,061 \text{ (кг)} = 61 \text{ (г)}.$$

2. Визначаємо коефіцієнт K_B :

$$K_B = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_e}{m_n}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{36,34}{61}}} = 0,791$$

3. Визначаємо коефіцієнт α враховуючи закріплення плати по чотирьом сторонам:

$$\alpha = \pi^2 \cdot \left(1 + \frac{a^2}{b^2}\right) = \pi^2 \left(1 + \frac{0,16^2}{0,12^2}\right) = 27,4.$$

4. Визначаємо циліндричну жорсткість D

					ДК52.411734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

$$D = \frac{E * h^3}{12 * (1 - \mu^2)} = \frac{30 * 10^9 * 0,0015^3}{12 * (1 - 0,25^2)} = 9 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

5. Визначаємо власну частоту коливань друкованої плати

$$f_{\text{влас}} = \frac{K_{\text{в}} * \alpha}{2 * \pi * a^2} * \sqrt{\frac{D * g}{v * h}} = \frac{0,791 * 27,4}{2 * \pi * 0,16^2} * \sqrt{\frac{9 * 9,81}{2,05 * 10^4 * 0,0015}} \approx 285 \text{ (Гц)}.$$

Якщо $f_{\text{влас}} > 250$ (Гц), то конструкція абсолютно жорстка [33].

Висновки до розділу 4.

1. Сумарне споживання за струмом активних елементів складає близько 123 мА. Для цього провідники живлення має бути товщими за 0,264 мм. Допустиме падіння напруги на провіднику складає 0,165 В. З огляду на це обмеження найменша можлива ширина провідника – 0,053 мм, що є меншим за найменшу ширину провідника у схемі.

2. В платі наявно 3 типи отворів для під'єднання компонентів, з діаметром 1,3 мм, 2,8 мм та 1,1 мм відповідно.

3. Мінмальна відстань між провідником і контактним майданчиком складає 0,05 мм. Відстань між краями сусідніх провідників – 0,15 мм, що задовільняє обраний клас точності.

4. Електричний розрахунок плати показав, що падіння напруги на найдовшому провіднику складає 24,7 мВ, що не перевищує 5% від напруги живлення. Потужність втрат друкованої плати є нехтовною і складає 0,66 нВт. Найбільша ємність та індуктивність між двома провідниками складає 18,75 нФ та 0,04 нГн відповідно.

5. Розрахунок надійності показав, що ресурс виробу складає 68000 год неперервної роботи, що задовільняє ТЗ. Вірогідність відмов протягом першого року роботи – 8,6 %. Розрахунок віброміцності підтвердив, що плата є абсолютно жорсткою.

						ДК52.4 11734.001 ПЗ	Адк.
							58
Змн.	Адк.	№ док.	Підпис	Дата			

Розділ 5. ПРОГРАМУВАННЯ ПРИСТРОЮ.

5.1. Програмування мікроконтролера STM32F303CB

В якості керуючого пристрою використовувався мікроконтролер STM32F303CB. Мікроконтролер забезпечує зчитування даних від датчиків, керування ЦАП, дисплеєм і реле, записом даних на ноутбук та SD карту. Дані від датчика струму і напруги INA226 та датчика освітленості зчитуються за протоколом I2C. Температура визначається за напругою на термісторі, виміряною АЦП. Передача даних до ноутбука здійснюється за протоколом UART, запис до картки пам'яті - за SPI. Лістинг програми наведено в додатку В.

Налаштування мікроконтролера для роботи за даними протоколами проводилося в середовищі Cube MX (рис. 5.1). В якості протоколів передачі даних були підключені I2C1, SPI1 та UART2.

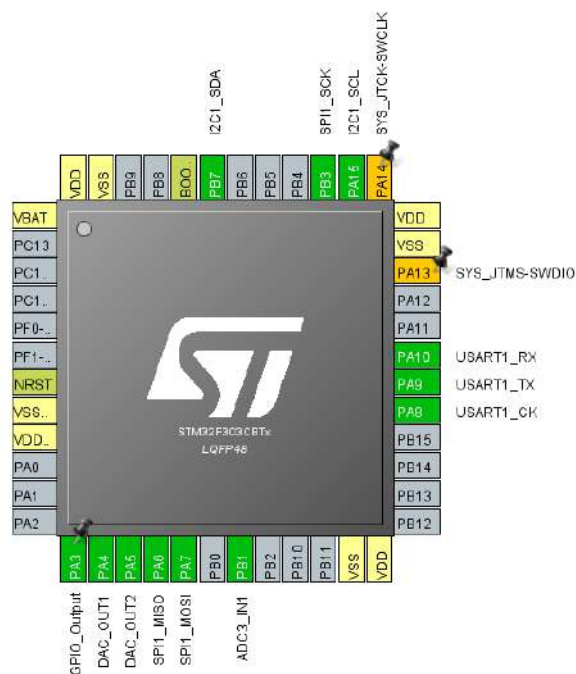


Рис. 5.1 Налаштування STM32 в CubeMX

Блок-схема програми приведена на рис. 5.3 та рис. 5.4.

Спочатку відбувається ініціалізація портів, протоколів, ЦАП та давачів. Далі програма переходить в основний цикл, де виконується послідовне збільшення коду на вході ЦАП, прийом даних від давачів та їх передача в послідовний порт ноутбука. При завершенні виміру світлової ВАХ, автоматично починає вимірюватися темнова ВАХ.

5.1.1 Підключення давачів

Розглянемо ініціалізацію давачів струму та напруги, а також датчика освітленості за інтерфейсом I2C. Часова діаграма сигналу для відправки даних до датчика за протоколом I2C наведена на рис. 5.2.

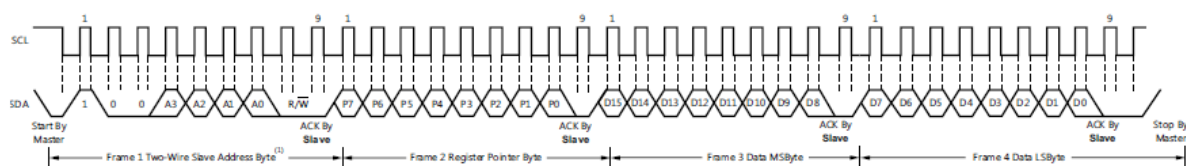


Рис. 5.2 Часова діаграма запису команди до датчика

Дані для відправки розбиваються на 2 фрейми: фрейм адреси і даних. Спочатку відправляються 7 біт, що визначають адресу пристрою, далі відправляється 1 чи більше байт із даними.

Умова початку передачі – перехід лінії даних SDA в 0 відбувається раніше за перехід в 0 тактового сигналу SCL. Зчитування даних починається після позитивного фронту SCL.

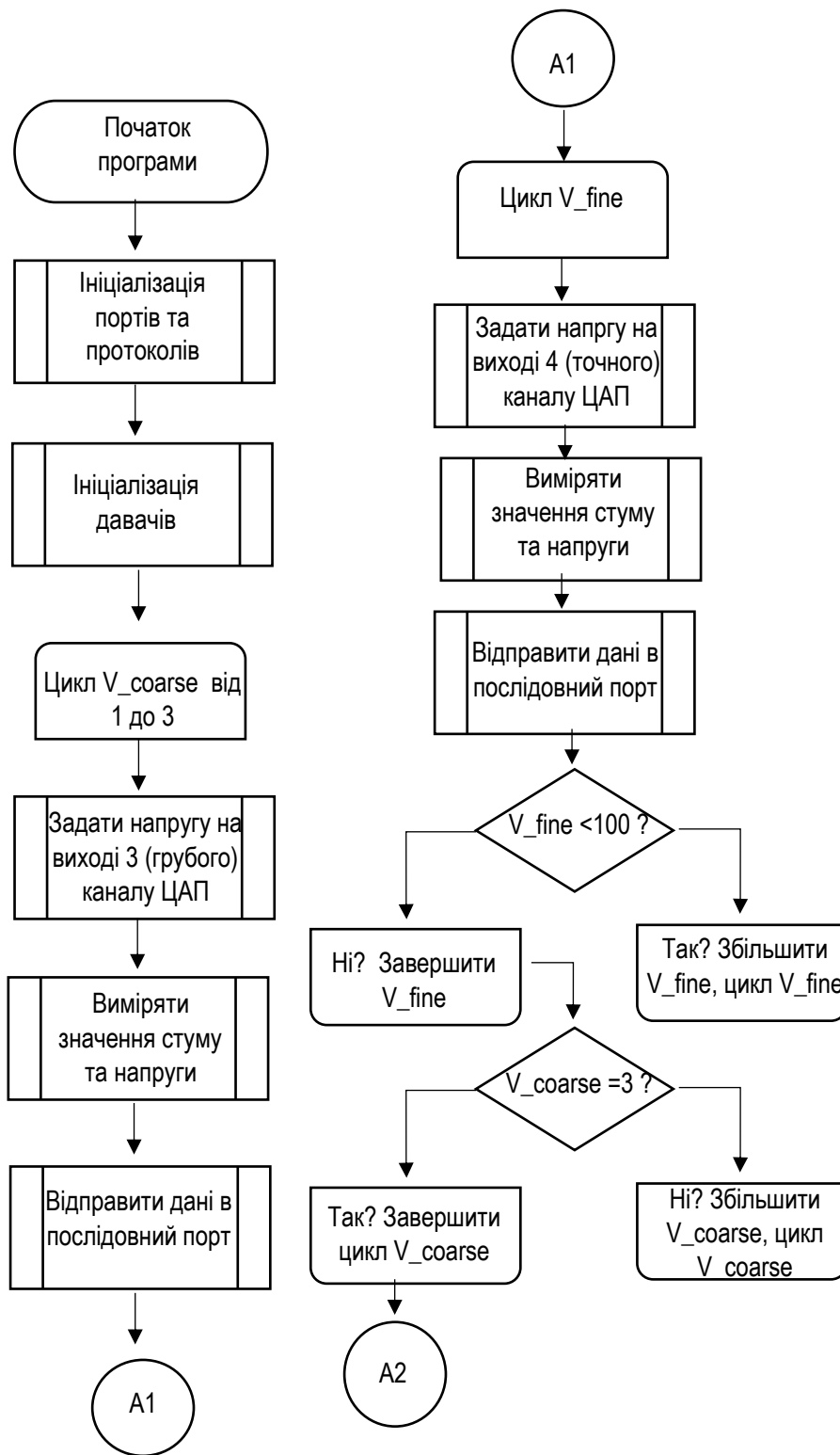


Рис. 5.3 Блок схема програми



Рис. 5.4 Продовження блок схеми програми

8 біт фрейму адреси – індикатор операції запису (значення 1) чи зчитування (значення 0) даних. 9 біт – індикатор успішного зчитування даних: 0 означає успішне зчитування.

Після того як адреса була успішно відправлена дані поступають на лінію SDA при кожному такті на лінії SCL. Після кожного байту даних слідує сигнал про успішний прийом даного байту.

Коли була відправлена необхідна кількість байт даних, генерується так звана «стоп» команда: лінія SDA переходить в значення 1 після переходу в 1 лінії SCL.

Для давача струму відправляється 3 байти даних. 1 байт – адреса регістру, 2 і 3 байти – значення для запису в регістр. За замовчуванням датчик INA226 має адресу 0x40.

Налаштування відбувається записом конфігураційного значення в регістр Control register. Визначається значення таких параметрів: кількість вимірюваних значень для усереднення, час конвертації напруги Vbus, час конвертації напруги Vshunt та режим роботи.

В програмі, пристрій налаштовується на вимірювання за 4 усередненими значеннями, на 1.1 мс для конвертації напруг Vbus та Vshunt (рекомендоване значення за замовченням) та в режим постійного вимірювання струму напруги.

Приклад коду для запису даного значення наведено на рис. 5.5.

```
ConfigWord = 0x327;  
I2C_Data[0] = 0x00;  
I2C_Data[1] = (ConfigWord & 0xFF00) >> 8;  
I2C_Data[2] = (ConfigWord & 0x00FF);  
HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2cl, DevAddr, I2C_Data, 3, 20);
```

Рис. 5.5 Приклад підпрограми для запису значення в давач струму

Для передачі даних використовується функція HAL_I2C_Master_Transmit. В якості параметрів використовується структура, що містить налаштування I2C протоколу, адреса пристрою (0x40), посилання на перший елемент байтового масиву даних для передачі, кількість байт для передачі, максимальний час очікування.

					ДК52.4 11734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Після конфігурації Control register, налаштовується Calibration register. Оскільки датчик визначає струм за падінням напруги на шунтовому резисторі, необхідно забезпечити правильне перетворення значень виміряної напруги в струм.

Значення, що записуються в регістр струму обчислюється за формулою 5.1:

$$Current = \frac{Voltage * CalibrationRegister}{2048} \quad (5.1)$$

, де Current - значення записане в регістр струму, Voltage – значення записане в регістр напруги, Calibration Register – значення в калібровочному регістрі.

Відповідно до документації , найменше значення напруги, що вимірює датчик на шунтовому резисторі – 2.5 мкВ. Дане значення відповідає значенню 0x01 в регістрі напруги.

При використанні шунтового резистора в 0.1 Ом, найменше вимірюване значення струму відповідає 25 мкА, при якому в регістр струму буде записано 0x01. Таким чином, 1 в регістрі напруги відповідає 1 в регістрі струму. Отже, значення калібровочного регістра має бути рівне 2048.

Приклад повідомлення для ініціалізації давача освітленсті наведено на рис. 5.6.

Адреса пристрою (Slave address)				Команда (Opcode)			
ST	0100011	0	Ack	00010000	Ack	SP	

Рис. 5.6 Відправка команди давачу освітленсті

Для зчитування даних відправлявся байт з адресою. У відповідь надходило 2 байти із значенням освітленсті (рис.5.7).

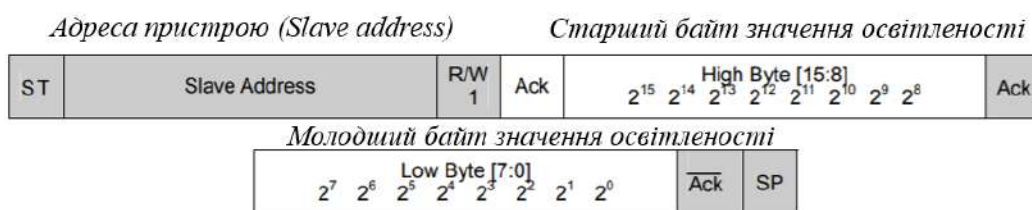


Рис. 5.7 Зчитування даних із датчика

Згідно документації [34], значення освітленості розраховувалося за формулою 5.2.

$$H = \frac{B}{1,2} \quad (5.2)$$

де B – значення слова зчитаного від датчика у десятковому форматі.

Дані з термістора NTCLE зчитувалися як напруга за допомогою АЦП. В документації на датчик [35] наведена залежність його опору від температури. Відповідно до цих даних, виміряна АЦП напруга перетворювалася в значення температури за шкалою Цельсія.

5.1.2 Вимірювання вольт – амперної характеристики

На початку програми, напруга на виході ЦАП збільшується з кроком у 25 мкВ, це необхідно, щоб дослідити ВАХ при малих струмах.

При досягненні значення вихідного струму у 200 мкА, крок зміни напруги зростає до 0,7 мВ.

Значення на виході ЦАП задається за допомогою команди *HAL_DAC_SetValue*. Значення струму визначається підпрограмою *GetCurrent*. Отримуючи значення з регістру струму, підпрограма повертає струм в мА, домножуючи вміст регістра на значення найменш значного біта (25 мкА). Якщо значення в регістрі записане в додатковому коді, перед конвертацією в дійсне значення струму, виконується його переведення в прямий код. Результат домножується на -1. Код підпрограми приведений на рис. 5.8.

5.2. Програмування віртуального пристрою в середовищі LabVIEW

Для прийому даних від мікроконтролеру використали додатковий пакет програмного забезпечення VISA. Для генерації звіту використали пакет MS office report, створивши власний 'темплейт' для введення даних. В шаблоні передбачили автоматичну побудову графіка екселем при надходженні даних із LabVIEW. Код підпрограми Create report, що реалізує запис даних у файл, наведено на рис. 5.10.

Користувач може ввести своє ім'я, а також коментарі стосовно експерименту. Дата експерименту буде визначена автоматично.

Перед записом в таблицю, дані конвертуються із формату строки в числовий формат і записуються в масив.

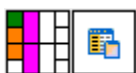
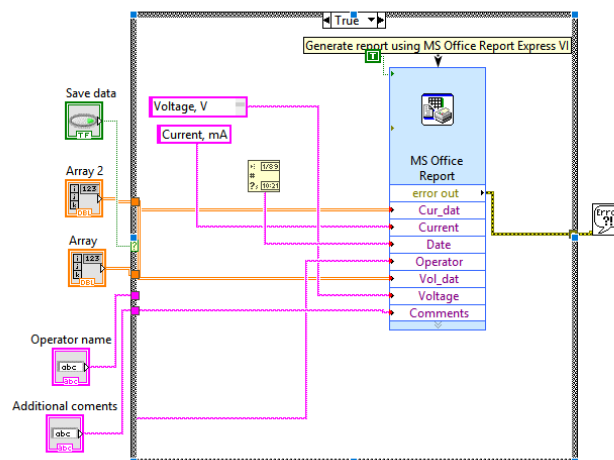


Рис.5.10 Запис даних у файл

Код підпрограми для побудови графіку наведено на рис. 5.11. Для побудови графіку використовувалася функція Build XY graph.

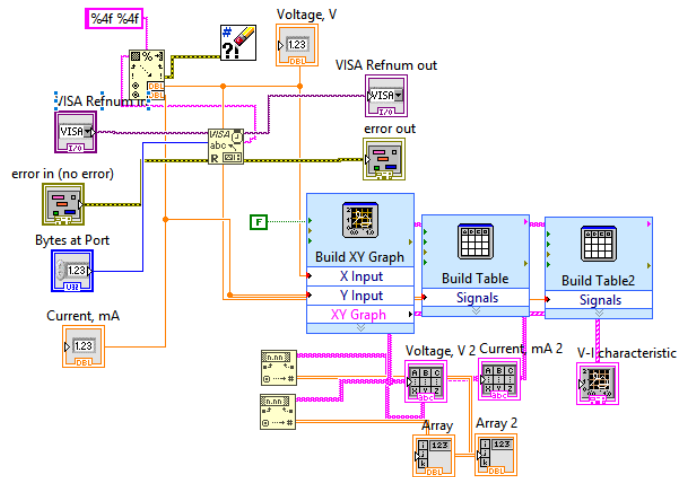


Рис. 5.11 Підпрограма вимірювання ВАХ

Код головної програми наведено на рис. 5.12. Витримано одне з правил хорошого програмування в середовищі LabVIEW - весь код видно без розширення вікна. Вид передньої панелі пристрою наведено на рис. 5.13.

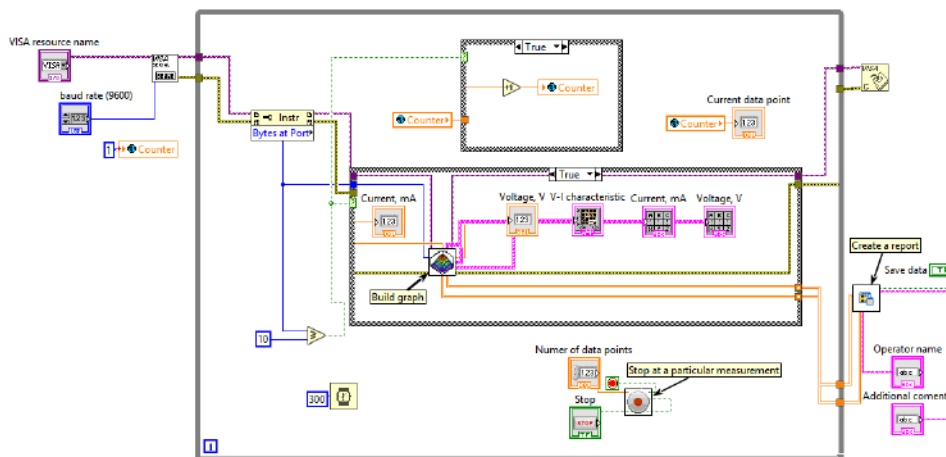


Рис. 5.12 Графічний код приладу

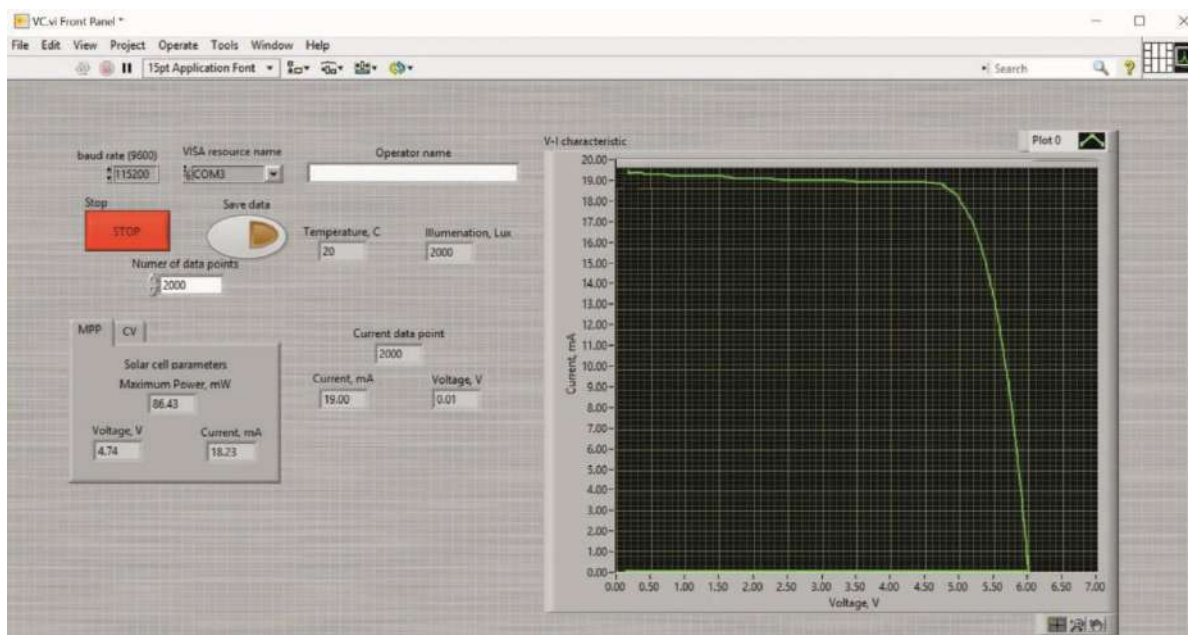


Рис. 5.13 Вигляд передньої панелі приладу

Висновки до 5 розділу.

1. В якості керуючого пристрою використовувався мікроконтролер STM32F303CB, забезпечує зчитування даних від датчиків, керування ЦАП, дисплеєм і реле, записом даних на ноутбук та SD карту. Налаштування потрів та інтерфейсів виконувалося у середовищі графічного програмування CubeMx з подальшим налаштуванням у KeilMDK.

2. Дані від датчика струму і напруги INA226 та датчик освітленості зчитуються за протоколом I2C. Температура визначається за напругою на термісторі, вимірюною АЦП. Передача даних до ноутбука здійснюється за протоколом UART, запис до картки пам'яті - за SPI.

3. Вимірювання ВАХ контролюється ЦАП мікроконтролера. Можливе регулювання за тонким каналом з точністю в 25 мкВ і за грубим з точністю 0,7 мВ.

4. Розроблено графічний інтерфейс приладу в середовищі LabVIEW, який дозволяє візуалізувати ВАХ і записати дані у файл.

										ДК52.4 11734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата							69

Розділ 6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

6.1 Калібрування давача струму і напруги

Для калібрування датчика було проведено серію вимірювань, де значення струму через зразок визначалося за показами INA226 і показами прецизійного мультиметра В7-46.

Отримані залежності код–струм наведені на рис.6.1.

Залежність для значень, виміряних із В7-46 апроксимується прямою з рівнянням (6.1):

$$I = k_m \cdot n + b_m = 0,0003881 \cdot n - 0,0749, \quad (6.1)$$

де n – значення об'єднаного коду, k_m – коефіцієнт пропорційності, b_m – вільний член.

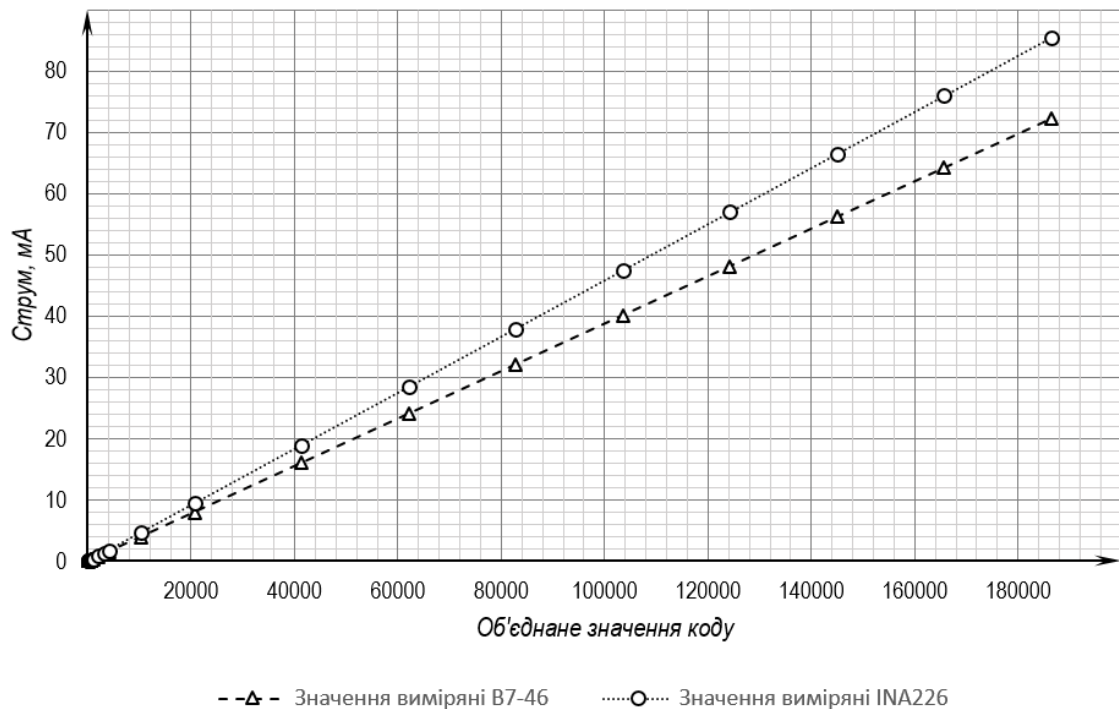


Рис. 6.1 Залежність код–струм для значень виміряних за допомогою INA226 та В7-46

Залежність для значень, вимірянних за допомогою INA226, апроксимується прямою з рівнянням (6.2):

$$I = k_i \cdot n + b_i = 0,0004596 \cdot n - 0,1319, \quad (6.2)$$

де k_i – коефіцієнт пропорційності, b_i – вільний член.

Коефіцієнт кореляції з прямою пропорційністю в обох випадках є більшим за 99,9%. Це свідчить про хорошу лінійність залежності код – струм.

Для того, щоб скоригувати покази INA226, достатньо ввести поправкові коефіцієнти, щоб рівняння апроксимованої прямої для В7–46 та INA226 сходилися.

Перший коефіцієнт (коефіцієнт пропорційності) можна знайти за формулою (6.3) :

$$k_1 = \frac{k_m}{k_i} = \frac{0,0003881}{0,0004596} = 0,8442, \quad (6.3)$$

де k_m – коефіцієнт пропорційності з рівняння (6.1), а k_i - з рівняння (6.2).

Другий коефіцієнт, вільний член, знаходимо за формулою:

$$k_2 = b_m - b_i \cdot k_1 = 0,0749 - 0,1319 \cdot 0,844 = 0,0458, \quad (6.4)$$

де b_m – вільний член з рівняння (6.1), а b_i – вільний член з рівняння (6.2).

Таким чином, значення струму, вимірянні за допомогою INA226, можуть коригуватися за формулою:

$$I' = I \cdot k_1 + k_2 = I \cdot 0,8442 + 0,0458, \quad (6.5)$$

де I' - скориговане значення струму, I – значення струму, виміряне INA226.

6.2 Визначення параметрів сонячного елемента за його ВАХ

Для експериментальних досліджень використовувалася полікристалічна сонячна панель потужністю 0,7 Вт із напругою розімкненого кола 5,5 В. Враховуючи, що напруга розімкненого кола одного сонячного елемента складає близько 0,5-0,6 В [18], можна стверджувати, що в даній батареї знаходиться близько 10 послідовно з'єднаних сонячних елементів. Це буде враховано при визначенні параметра неідеальності та послідовного опору.

Параметри визначалися за методикою, описаною в першому розділі.

Спершу, за допомогою описаної установки було отримано пряму гілку темної ВАХ (рис. 6.2).

Вона описується рівнянням (6.6):

$$I = I_{зв} \cdot (e^{\frac{q}{AkT} \cdot U} - 1). \quad (6.6)$$

В логарифмічному вимірі, враховуючи, що $I \gg I_{зв}$:

$$\ln I \approx \ln I_{зв} + \frac{q}{AkT} U.$$

Із отриманого графіку апроксимацією за методом найменших квадратів встановлено, що в напівлогарифмічному масштабі $\ln(I) = f(U)$ залежність можна описати формулою (6.7)

$$\ln(I) = 2,066 \cdot U - 16,195. \quad (6.7)$$

Тоді $q/AkT = 2,066$ (Кл/Дж), $I_{зв} = 0,09$ (мкА).

Знайдемо параметр неідеальності:

$$A = \frac{q}{k \cdot T \cdot 2,066} = \frac{1}{\varphi \cdot 2,066} = \frac{10^3}{25,87 \cdot 2,066} = 19,32.$$

Враховуючи, що елементів у батареї близько $N=10$, параметр неідеальності A' для одного елемента можна знайти як:

									ДК52.4 11734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата						72

$$A' = \frac{A}{N} = \frac{19,32}{10} = 1,932.$$

Значення 1,932 добре узгоджується із теоретичними значеннями, які для полікристалічних елементів складаються від 1 до 3.

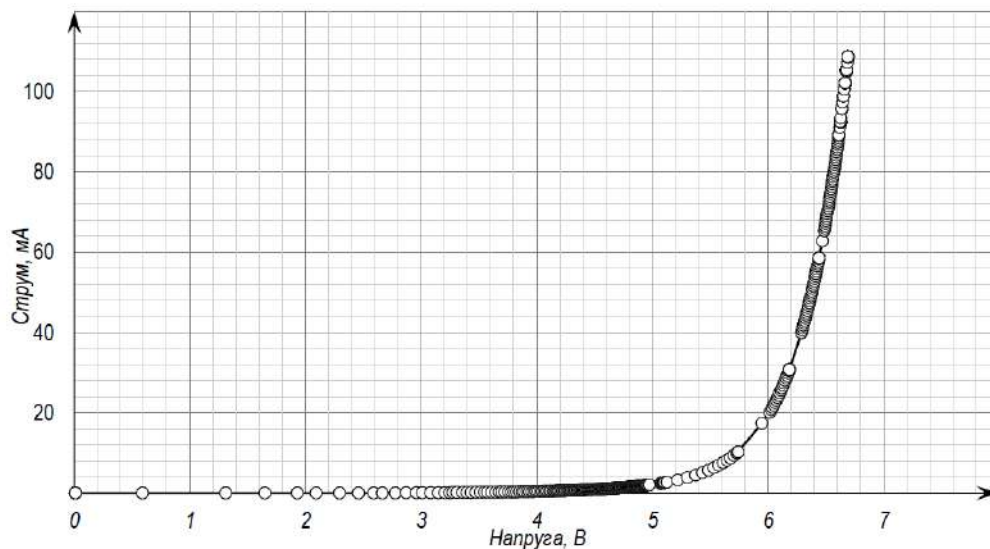


Рис. 6.2 Пряма гілка темної ВАХ

Далі, була виміряна світлова ВАХ, що наведена на рис. 6.3. Значення фотоструму I_{ϕ} за освітленості 2000 Лк і температури 22°C склало 19,8 мА. З отриманих експериментальних даних визначено, що точка максимальної потужності - 18,7 мА, 4,95 В, тобто 92,56 мВт.

Послідовний опір визначався шляхом вимірювання додаткової світлової ВАХ за меншого рівня освітленості, що склав 1200 Лк. Значення фотоструму і напруги розімкненого кола за даної освітленості склало 11 мА та 5,9 В відповідно.

Значення послідовного опору обчислювалося за формулою 6.8:

$$R_{п} = \frac{\Delta U_{pz}}{\Delta I_{\phi}} = \frac{6 - 5,9}{19,8 - 11} = \frac{0,1}{8,8} = 11,3 \text{ (Ом)}, \quad (6.8)$$

де ΔU_{pz} та ΔI_{ϕ} – різниця напруг розімкненого кола та фотострумів за різних рівнів освітленості.

Враховуючи, що елементів у батареї близько $N=10$, послідовний опір для одного елемента можна знайти як:

$$R_{п'} = \frac{R_{п}}{N} = \frac{11,2}{10} = 1,2 \text{ (Ом)}.$$

Підставивши обчислені значення параметрів у рівняння (6.9):

$$I = I_{\phi} - I_{зв} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (U + I \cdot R_{п})}{AkT}} - 1 \right), \quad (6.9)$$

отримаємо рівняння (6.10) моделі СЕ за освітленості 2000 лк і температури 22°C:

$$I = 19,8 \cdot 10^{-3} - 0,09 \cdot 10^{-6} \left(e^{2,066 \cdot (U + I \cdot 11,3)} - 1 \right). \quad (6.10)$$

ВАХ, що побудована за даним рівнянням, зображена на рис. 6.4. На тому ж рисунку, для порівняння, зображено ВАХ без врахування послідовного опору, а також ВАХ за експериментальними даними. Видно, що врахування послідовного опору наближує ВАХ моделі СЕ до ВАХ реального сонячного елемента.

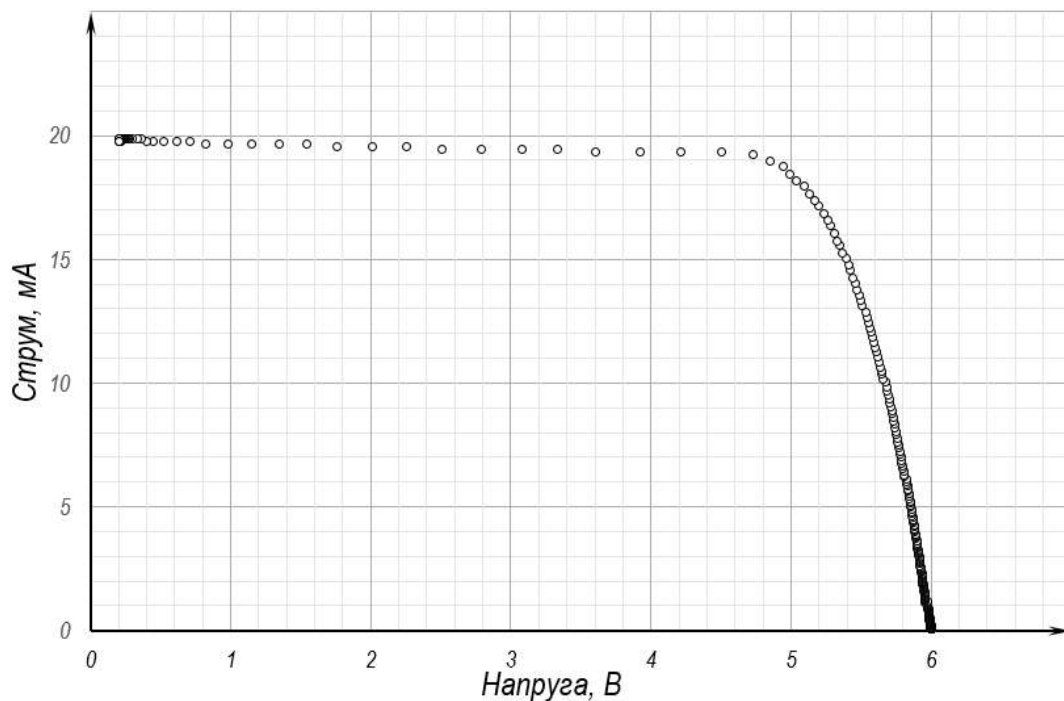


Рис. 6.3 Виміряна світлова ВАХ

Досліджувався діапазон освітленості від 1000 до 2500 Лк і діапазон температур від 280 К до 320 К.

Залежність максимальної потужності P_{max} від температури T та освітленості E представлена у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Залежність максимальної потужності SE від освітленості і температури

Потужність, мВт		Температура, К					
		280	290	295	300	310	320
Освітленість, Лк	2500	77,2	102,9	114,7	125,7	138	151,8
	2000	50,8	77	89,1	96,9	115,5	193,4
	1500	25,8	52	64,4	74	93,3	109,8
	1200	11,9	37,7	50,0	60,5	80,7	109,7
	1000	3,4	28,5	40,9	51,5	72,4	89,6

За допомогою пакету регресійного аналізу в *Microsoft Excel* отримали коефіцієнти b поліному, яким можна апроксимувати значення потужності за різних значень температури і освітленості:

$$P_{max} \approx b_0 + b_1 * E + b_2 * T + b_3 * E * T + b_4 * T * E^2 + b_5 * E * T^2 + b_6 * E^2 + b_7 * T^2$$

Значення коефіцієнтів наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 - Коефіцієнти поліному

b_0	-610.041
b_1	-0.62462
b_2	5.31031
b_3	-3E-05
b_4	7.91E-06
b_5	-1.3E-06
b_6	0.000395
b_7	-0.01116

Коефіцієнти b_3, b_4, b_5 вважатимемо незначимими. Таким чином, маємо рівняння залежності ТМП від температури і освітленості:

$$P_{max} \approx -610.041 - 0.62462 * E + 5.31031 * T + +0.000395 * E^2 + -0.01116 * T^2.$$

Знайдено дисперсію, порівнюючи значення отримані з моделі і з очисленими за експериментальними даними:

$$\sigma^2 = 12.8.$$

Тоді середнє квадратичне відхилення складає:

$$\sigma = 3,57 \text{ (мВт)}.$$

Отримані значення дисперсії та середньоквадратичного відхилення свідчать про достовірність розрахованої моделі.

Висновки до розділу 6.

1. Давач струму INA226 було відкалібровано за показами прицевійного вольтметра В7-46. Отримані залежності код-струм за вимірами INA226 та В7-46. Коефіцієнт кореляції з прямою пропорційністю для обох залежностей є більшим за 99,9%, що свідчить про хорошу лінійність залежності код – струм. Для того, щоб скоригувати покази INA226, достатньо ввести поправкові коефіцієнти, щоб рівняння апроксимованої залежності код-струм для В7–46 та INA226 сходилися.

2. В результаті вимірювання світлової та темної ВАХ сонячного елемента за температури 22 °С та освітленості 2000 Лк були визначені значення параметрів моделі сонячної батареї. Фотострум - 19,8 мА, зворотній струм – 0,09 мкА. Для окремих елементів сонячної батареї – послідовний опір 1,2 Ом, параметр неідеальності 1,93, що сходиться із типовими значеннями, що наводяться в літературі.

					<i>ДК52.4 11734.001 ПЗ</i>	<i>Адк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		77

3. Методом регресійного аналізу було встановлено рівняння залежності ТМП від освітленості і температури. Середньоквадратичне відхилення моделі склало 3,57 мВт.

					ДК52.411734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

ВИСНОВКИ

1. Методи визначення точки максимальної потужності з використанням моделі сонячного елемента є перспективними з огляду на простоту програмної реалізації на мікроконтролері. Визначення параметрів сонячного елемента важливо для контролю параметрів при виробництві, а також для досліджень в наукових лабораторіях.

2. Для експериментальних досліджень обрана схема заміщення сонячного елемента із чотирма невідомими параметрами (фотострум, зворотній струм, параметр неідеальності, послідовний опір). Для знаходження параметрів використовувалася світлова ВАХ за двох різних рівнів освітленості, а також темнова ВАХ.

3. Розроблена система для автоматизованого визначення параметрів СЕ включає в себе мікроконтролер STM32F303CB, із модулем для роботи з числами з плаваючою комою та ЦАП, програмоване джерело струму (для вимірювання темнової ВАХ), керований опір (для вимірювання світлової ВАХ), давач струму та напруги INA226 та ноутбук із середовищем графічного програмування LAbVIEW. Предбачено підключення давачів освітленості та температури, а також SD карти для збереження залежності ТМП від освітленості та температури. Проведені розрахунки за схемою електричною принциповою узгоджуються з результатами симуляцій.

4. При вимірюванні темнової ВАХ, керування струмом здійснюється за точним (з точністю 0,8 мкА) та грубим каналом (з точністю 23 мкА). Точність вимірювання струму давачем INA226 складає 25 мкА в діапазоні до 800 мА. Враховуючи лінійність залежності код-струм для схеми перетворення напруга-струм, покази INA226 можливо апроксимувати для визначення менших значень струму.

5. Для розробленої системи була виготовлена друкована плата за 4 класом точності. Розрахунки елементів монтажу підтверджують

					<i>ДК52.4 11734.001 ПЗ</i>	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

відповідність плати 4 класу точності. Електричний розрахунок плати показав, що потужність втрат друкованої плати є нехтовною і складає 0,66 нВт. Значення найбільшої ємності та індуктивності між провідниками складають 18,75 нФ та 0,04 Гн відповідно. розрахунок надійності показав, що ресурс виробу складає 68000 год неперервної роботи.

6. Програмування мікроконтролера виконувалося з використанням середовища CubeMx, з подальшими налаштуваннями в Keil MDK. 2. Дані від датчика струму і напруги INA226 та датчик освітленості зчитуються за протоколом I2C. Температура визначається за напругою на термісторі, вимірюною АЦП. Передача даних до ноутбука здійснюється за протоколом UART, запис до картки пам'яті - за протоколом SPI. Розроблено графічний інтерфейс приладу в середовищі графічного програмування LabVIEW, що дозволяє візуалізувати ВАХ і записати дані у файл.

7. В результаті вимірювання світлової та темної ВАХ сонячного елементу за температури 22 °С та освітленості 2000 люкс були визначені значення параметрів моделі сонячної батареї. Фотострум - 19,8 мА, зворотній струм – 0,09 мкА. Для батареї із 10 послідовно з'єднаних сонячних елементів– послідовний опір склав 12 Ом, параметр неідеальності – 19,3. Методом регресійного аналізу було встановлено рівняння залежності ТМП від освітленості і температури. Середньоквадратичне відхилення моделі склало 3,57 мВт.

8. Розроблений пристрій задовольняє ТЗ.

						ДК52.4 11734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата			80

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. “Global Market Outlook For Photovoltaics Until 2016”, European Photovoltaic 2012.
2. Hohm D. P. and. Ropp M. E., “Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms,” Progress in Photovoltaics: Research and Innovations, pp. 47 – 62, 2002, DOI: 10.1002/pip.459.
3. Alik R. et al., “Modified Perturb and Observe (P&O) with checking algorithm under various solar irradiation”, Solar Energy 148 (2017) 128–139.
4. Рускин В.А и др. “Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышающего преобразователя напряжения солнечного инвертора”, Известия Томского политехнического университета, Инжиниринг георесурсов., 2016, № 4, 78.
5. Tse K. “Comparative Study of Maximum-Power-Point Trackers for Photovoltaic Panels Using Switching-Frequency Modulation Scheme”, IEEE transactions on industrial electronics, v April 2004, ol. 51, no. 2.
6. Van der Merwe L “Maximum power point tracking—implementation strategies,” Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1998, pp. 214–217.
7. Mellit A. “Modeling and simulation of a stand-alone photovoltaic system using an adaptive artificial neural network: Proposition for a new sizing procedure”, Renewable Energy 32 (2007), 285–313.
8. Bidyadhar S. “ Characteristics Evaluation and Parameter Extraction of a Solar Array based on Experimental Analysis” IEEE PEDS 2011, Singapore, 5 - 8 December 2011.
9. Silton R. et al., “Measurement of current voltage characteristic curves of solar cells and solar modules”, US patent 7 309 850, Dec 18, 2007.
10. Celik A., “Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic

аппаратуры под редакцией В.А. Шахнова”, Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана, Москва, 2002.

33. Парфенов. Е. М “Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры”, Издательство “Радио и связь” 1989.

34. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://bit.ly/2LQIRW6>.

35. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://bit.ly/2LQIRL6>.

ГОСТ 28884-90 РЯДЫ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ РЕЗИСТОРОВ И КОНДЕНСАТОРОВ

ГОСТ 23571-86 ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ Основные параметры конструкции

ГОСТ 23216-78 Изделия электротехнические. Хранение, транспортирование, временная противокоррозионная защита, упаковка.

ГОСТ 26246.5-89 Материал электроизоляционный фольгированный нормированной горючести для печатных плат на основе стеклоткани, пропитанной эпоксидным связующим (FR-4)

керування струмом здійснюється за допомогою грубого та точного каналів

					ДК52.4 11734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

Для виробництва пристрою використовують матеріали імпортного та вітчизняного виробництва.

5.8. Умови експлуатації.

Кліматичне виконання УХЛ.3.1 по ГОСТ 15150-69.

5.9. Вимоги до транспортування і зберігання.

Група умов зберігання Л1 по ГОСТ 15150-69. Зберігати в зачинених, опалювальних та вентильованих приміщеннях, в яких забезпечуються наступні умови: температура повітря +5...+40 °С, відносна вологість повітря 60% при 20 °С (середньорічне значення), атмосферний тиск 84...106кПа.

Прилад повинен витримувати середні (С) вимоги транспортування згідно ГОСТ 23216-78.

5.10. Додадкові технічні вимоги:

Технічні характеристики:

Діапазон вимірюваних значень	напруга: 0 – 7 В струм: 0 – 400 мА
Роздільна здатність за струмом (не менше)	25 мкА
Габаритні розміри	не більше 200x150x40 мм
Живлення	±12 В ± 5 % 3,3 В ± 5 % 9 В ± 5 %

6. Результати роботи

6.1. Результати даної роботи можуть бути використані як вихідна документація по створенню прототипу пристрою, його програмування, налагодження й подальшого впровадження в серійне виробництво.

					ДК52.4 11734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

6.2. Дана робота (звітна документація) після виконання надається на кафедру КЕОА для подальшого захисту й зберігання як навчальної документації.

7. Робота повинна містити:

пояснювальну записку (формату А4, до 100 аркушів) ;

схему електричну принципову та перелік елементів (формату А3, А4 відповідно) ;

складальне креслення плати та специфікацію (формату А1, А4 відповідно);

креслення друкованої плати (формату А1) ;

складальне креслення коробки, кришки, складальне креслення коробки з платою (А3, А3, А3 відповідно);

додатки (формату А1-А4).

8. Порядок розгляду й приймання роботи

Порядок розгляду й приймання роботи на загальних умовах, прийнятих на кафедрі КЕОА. Рецензування й прийняття роботи комісією на загальних умовах.

9. Економічні показники

В умовах даного проекту не розглядаються.

					<i>ДК52.411734.001 ПЗ</i>	<i>Адк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>88</i>

Додаток Б Лістинг програми

```

/* USER CODE BEGIN Header */
/*
 * COPYRIGHT(c) 2018 STMicroelectronics/* Includes -----*/
#define Ch_C 2
#define Ch_D 3
#include "main.h"
/* Private variables -----*/
I2C_HandleTypeDef hi2c1;

SPI_HandleTypeDef hspi1;

UART_HandleTypeDef huart2;

/* Private function prototypes -----*/
void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_USART2_UART_Init(void);
static void MX_I2C1_Init(void);
static void MX_SPI1_Init(void);
/* USER CODE BEGIN PFP */

/* USER CODE BEGIN 0 */
uint8_t spiData[3]; // output buffer for SPI interface
uint16_t Out_fine=0;
uint16_t Out;
uint16_t Out_coarse=0;
uint16_t Out_fine_dec = 0;
uint16_t Out_coarse_dec = 0;

float GetVoltage(uint16_t voltage_hex);
float GetShuntVoltage(uint16_t voltage_hex);
float GetCurrent(uint16_t current_hex);

uint8_t I2C_Data[3];
uint8_t Rec_Data[3];
uint8_t DevAddr = 0x80;
uint16_t ConfigWord;
uint16_t CalibWord;
uint16_t Receive;
uint16_t v_hex;
uint8_t SendOk;
float Voltage;
float Current;
float ShuntVoltage;
float VLSB = 0.0025; // in mV
float CLSB = 0.025; //in mA
float VLSB = 1.25; //mV
int i, j;

char data2[11]; //outut buffer for UART

uint16_t GetShuntVoltageReg(void);
uint16_t GetBusVoltageReg(void);
uint16_t GetCurrentReg(void);
void SetDACout(uint16_t value, uint8_t channel);

int main(void)
/* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick. */

```

					ДК52.4 11734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

```

HAL_Init();
/* Configure the system clock */
SystemClock_Config();
/* Initialize all configured peripherals */
MX_GPIO_Init();
MX_USART2_UART_Init();
MX_I2C1_Init();
MX_SPI1_Init();
/* USER CODE BEGIN 2 */
//Configure INA226
//*****1. Set Control register
//0 000 000 100 100 111 // use 4 averages, 1.1 ms conversion time
ConfigWord = 0x327;
I2C_Data[0] = 0x00;
I2C_Data[1]= (ConfigWord & 0xFF00) >> 8;
I2C_Data[2] = (ConfigWord & 0x00FF);
HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2c1, DevAddr, I2C_Data, 3, 20);
Receive = HAL_I2C_Master_Receive(&hi2c1, DevAddr, &Rec_Data[1],2,10);

//*****2. Set Calibration register
CalibWord = 0x800;
I2C_Data[0] = 0x05;
I2C_Data[1]= (CalibWord & 0xFF00) >> 8;
I2C_Data[2] = (CalibWord & 0x00FF);
SendOk = HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2c1, DevAddr, I2C_Data, 3, 10);
Receive = HAL_I2C_Master_Receive(&hi2c1, DevAddr, &Rec_Data[1],2,10);
HAL_Delay(100);

// Set up the DAC
//*****1. Do reset
Out = 0x0001;
spiData[1]= (Out & 0xFF00) >> 8;
spiData[2] = (Out & 0x00FF);
spiData[0] = 0x28; //00101000
HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_7, GPIO_PIN_RESET);
HAL_SPI_Transmit(&hspi1, spiData, 3, 10);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_7, GPIO_PIN_SET);
//2. ***Using internal reference
Out = 0x0001;
spiData[1]= (Out & 0xFF00) >> 8;
spiData[2] = (Out & 0x00FF);
spiData[0] = 0x38; //00111000 = 0x38
HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_7, GPIO_PIN_RESET);
if(!HAL_SPI_Transmit(&hspi1, spiData, 3, 10))
    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA, GPIO_PIN_5);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_7, GPIO_PIN_SET);
//3. Configuring LDAC (automatic code latching)
HAL_Delay(10);
Out = 0x000C;
spiData[1]= (Out & 0xFF00) >> 8;
spiData[2] = (Out & 0x00FF);
spiData[0] = 0x30; //00110000 = 0x30
HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_7, GPIO_PIN_RESET);
HAL_SPI_Transmit(&hspi1, spiData, 3, 10);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_7, GPIO_PIN_SET);

while (1)
{
    for(Out_coarse=1; Out_coarse < 3; Out_coarse++) //start incrementing coarse channel
    {

```



```

huart2.Init.StopBits = UART_STOPBITS_1;
huart2.Init.Parity = UART_PARITY_NONE;
huart2.Init.Mode = UART_MODE_TX_RX;
huart2.Init.HwFlowCtl = UART_HWCONTROL_NONE;
huart2.Init.OverSampling = UART_OVERSAMPLING_16;
if (HAL_UART_Init(&huart2) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
}
static void MX_GPIO_Init(void)
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct = {0};

    /* GPIO Ports Clock Enable */
    __HAL_RCC_GPIOC_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOH_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE();

    /*Configure GPIO pin Output Level */
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, LD2_Pin|GPIO_PIN_9, GPIO_PIN_RESET);

    /*Configure GPIO pin Output Level */
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_7, GPIO_PIN_RESET);

    /*Configure GPIO pin : B1_Pin */
    GPIO_InitStruct.Pin = B1_Pin;
    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_IT_FALLING;
    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
    HAL_GPIO_Init(B1_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);

    /*Configure GPIO pins : LD2_Pin PA9 */
    GPIO_InitStruct.Pin = LD2_Pin|GPIO_PIN_9;
    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
    GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
    HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStruct);

    /*Configure GPIO pin : PC7 */
    GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_7;
    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
    GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
    HAL_GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStruct);

}

/* USER CODE BEGIN 4 */
void SetDACout(uint16_t value, uint8_t channel)
{
    spiData[1]= (value & 0xFF0) >> 4;
    spiData[2] = (value & 0x00F)<<4;
    if(channel == Ch_C)
    spiData[0] = 0x12;
    if(channel == Ch_D)
    spiData[0] = 0x13;
    //00010010
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_7, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_SPI_Transmit(&hspi1, spiData, 3, 10);
}

```

```

HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_7, GPIO_PIN_SET);

}

uint16_t GetShuntVoltageReg(void){
    I2C_Data[0] = 0x01;
    SendOk = HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2c1, DevAddr, I2C_Data, 1, 10);
    Receive = HAL_I2C_Master_Receive(&hi2c1, DevAddr, &Rec_Data[1],2,10);
    return ((uint16_t)Rec_Data[1]<<8 | Rec_Data[2]);
}

uint16_t GetBusVoltageReg(void){
    //uint16_t res;
    I2C_Data[0] = 0x02;
    SendOk = HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2c1, DevAddr, I2C_Data, 1, 10);
    Receive = HAL_I2C_Master_Receive(&hi2c1, DevAddr, &Rec_Data[1],2,10);
    //res = (Rec_Data[1]<<8 | Rec_Data[2])
    return ((uint16_t)Rec_Data[1]<<8 | Rec_Data[2]);
}

uint16_t GetCurrentReg(void){
    I2C_Data[0] = 0x04;
    SendOk = HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2c1, DevAddr, I2C_Data, 1, 10);
    Receive = HAL_I2C_Master_Receive(&hi2c1, DevAddr, &Rec_Data[1],2,10);
    return ((uint16_t)Rec_Data[1]<<8 | Rec_Data[2]);
}

float GetVoltage(uint16_t voltage_hex){
    uint16_t tmp;
    if(voltage_hex>>15)
    {
        tmp=~voltage_hex;
        return (((tmp*(-1))+ 0x01)*VLSB);
    }
    else
        return voltage_hex*VLSB;
}

float GetShuntVoltage(uint16_t voltage_hex){
    uint16_t tmp;
    if(voltage_hex>>15)
    {
        tmp=~voltage_hex;
        return (((tmp*(-1))+ 0x01)*VLSB);
    }
    else
        return voltage_hex*VLSB;
}

float GetCurrent(uint16_t current_hex){
    uint16_t tmp;
    if(current_hex>>15)
    {
        tmp=~current_hex;

```

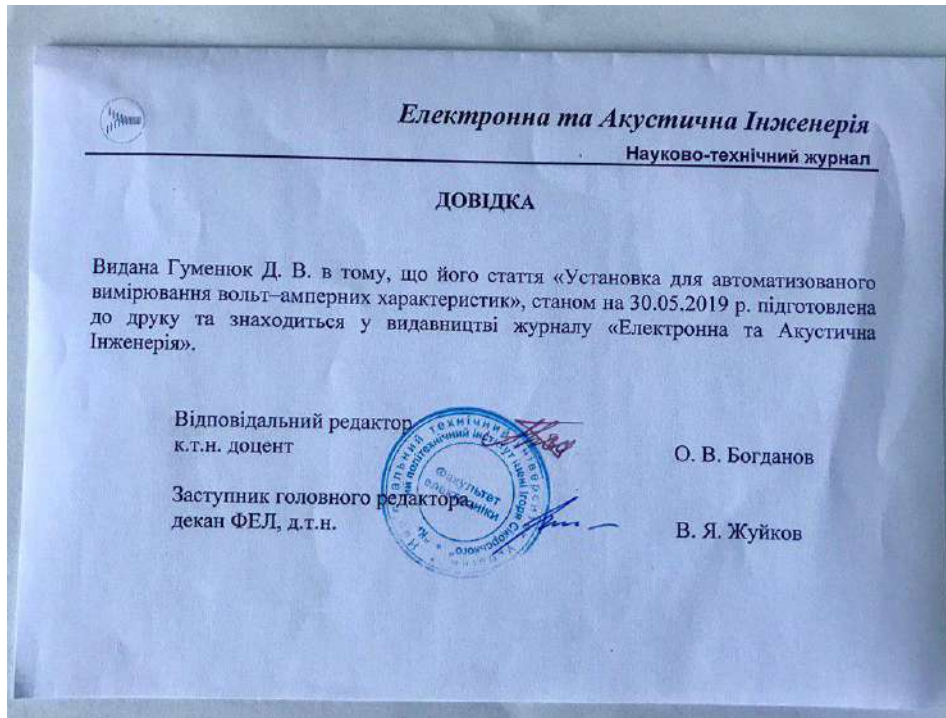
```
        return (((tmp*(-1))+ 0x01)*CLSB);
    }
    else
        return current_hex*CLSB;
}
```

					<i>ДК52.411734.001 ПЗ</i>	<i>Адк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		95

Додаток В Публікація

XI МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МОЛОДИХ ВЧЕНИХ «ЕЛЕКТРОНІКА-2019»

Гуменюк Д.В. «Автоматизована система визначення параметрів моделі сонячних елементів»



					ДК52.411734.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Адк.	№ док.	Підпис	Дата		96

Автоматизована система визначення параметрів моделі сонячних елементів

Гуменюк Д. В., ORCID [0000-0002-2983-8312](https://orcid.org/0000-0002-2983-8312)

e-mail: gumenyuk98@gmail.com

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури, Факультет електроніки

КПІ ім. Ігоря Сікорського

Київ, Україна

Запропонована автоматизована система, що дозволяє вимірювати світлову та темнову вольт-амперну характеристику (ВАХ) сонячного елементу (СЕ). Вимірювання та обробка даних здійснюється за допомогою віртуального приладу, створеного в середовищі LabVIEW. За отриманими даними побудована модель СЕ, що надалі може використовуватися для визначення точки максимальної потужності за різного рівня освітленості і температури. Запропоновано підхід для обчислення параметрів моделі СЕ за ВАХ, на основі якого була визначена точка максимальної потужності (ТМП) для сонячного модуля. Розходження з експериментальними даними складає 6,6 %.

Ключові слова — альтернативна енергетика, сонячні елементи, автоматизоване визначення параметрів

І. Вступ

Інтенсивне використання традиційних видів палива й поглиблення глобальної енергетичної кризи спонукають до пошуку альтернативних, екологічно чистих, поновлювальних джерел енергії. Одним з перспективних напрямків розвитку енергетики є пряме перетворення енергії Сонця в електричну за допомогою сонячних панелей. Для їх ефективного функціонування необхідно підтримувати такий режим роботи, який забезпечує максимальну вихідну потужність, що надходить до навантаження. ТМП на вольт-амперній характеристиці сонячних батарей залежна передовсім від освітлення і температури. Для визначення ТМП в динамічних процесах зміни умов експлуатації сонячних елементів важливо знати головні параметри й характеристики сонячних елементів, на основі яких створюють алгоритми для систем слідування за ТМП (англ. – « Maximum Power Point Tracking (MPPT)»).

Метою роботи є система автоматизованого визначення параметрів сонячних елементів для встановлення ТМП і оптимального опору навантаження, яка відрізняється від аналогічних інженерних рішень простотою реалізації, доступністю апаратно-програмних технологій обробки та візуалізації даних, сумісністю за основними конструкторсько-технологічними показниками з наявними системами MPPT.

ІІ. Основні підходи для визначення точки максимальної потужності

Методи слідування за точкою максимальної потужності умовно можна розділити на 3 групи.

До першої групи належать методи, засновані на алгоритмі збудження і спостереження [1]. В даному

алгоритмі довільно задається початкова точка на вольт-амперній характеристиці сонячного елементу. При зміні струму визначають, як змінюється потужність в порівнянні з попереднім кроком. Таким чином встановлюється точка, де потужність максимальна. Попри простоту втілення, за цим алгоритмом важко точно визначити ТМП. Точки, що знаходяться в околі, постійно перевірятимуться на наявність максимуму потужності, що зменшує ефективність алгоритму.

Методи другої групи базуються на тому, що положення точки максимальної потужності відоме заздалегідь і визначається у процентному відношенні до напруги розімкненого кола. Для сонячних елементів це значення складає 70 – 80 % від напруги розімкненого кола [2]. В процесі роботи сонячний елемент відключається від схеми слідування за ТМП, вимірюється його напруга розімкненого кола, і струм навантаження змінюється таким чином, щоб забезпечувати напругу на встановленому рівні. Недоліком є складність точного визначення ТМП, а також втрата потужності при відключенні елемента.

До третьої групи належать методи, де ТМП обчислюється на базі отриманої моделі сонячного елемента. Методи із цієї групи є найбільш простими для програмної реалізації на мікроконтролері (параметри моделі можуть зберігатися в пам'яті), а також дозволяють точно визначити ТМП. В роботах [3-5] описано підходи для визначення параметрів СЕ за точками зі світлової ВАХ, однак вони вимагають складних обчислень. В роботах [6-7] описано простий спосіб обчислення значень параметрів із використанням світлової та темрової характеристики СЕ, але установка, на якій проводилися дослідження, є застарілою і не автоматизованою. Система для автоматичного визначення ВАХ СЕ представлена у

						<i>ДК52.4 11734.001 ПЗ</i>	Адк.
							97
Змн.	Адк.	№ док.	Підпис	Дата			

[8], однак параметри моделі сонячного елемента при цьому не визначаються.

Тому метою даної роботи є розробка автоматизованої системи, яка дозволяє визначати параметри сонячного елемента, що надалі можуть бути збережені в пам'яті мікроконтролера (МК) і використані для обчислення ТМП.

III. ДОСЛІДЖУВАНІ ПАРАМЕТРИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Вольт-амперна характеристика сонячного елемента може бути описана рівнянням [9]:

$$I = I_{\phi} - I_{\infty} \cdot \left(e^{\frac{q(U+I \cdot R_{in})}{A k T}} - 1 \right) - \frac{U}{R_{in}}, \quad (1)$$

де I_{ϕ} – фотострум, що генерується елементом пропорційно до освітленості, I_{∞} – зворотний струм насичення, R_{in} – послідовний опір, R_{sh} – шунтувальний опір, q – заряд електрона, k – стала Больцмана, T – температура переходу, A – діодний фактор.

Виразу (1) відповідає еквівалентна схема заміщення (рис. 1).

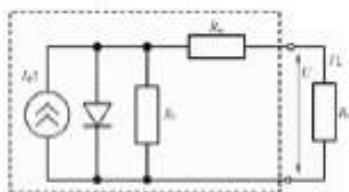


Рис. 1 Еквівалентна схема заміщення СЕ

Послідовний опір складається з опору контактів (опору переходу напівпровідник-метал) і опору напівпровідникового матеріалу, з якого виготовлений елемент. Зазвичай, його значення є нехтовно малим. При відносно великих рівнях засвічення можна також знехтувати впливом шунтувального опору [10], поклавши $R_{sh} \rightarrow \infty$.

Спрощена схема заміщення СЕ, що використовувалася для розрахунків у даній роботі, наведена на рис. 2.

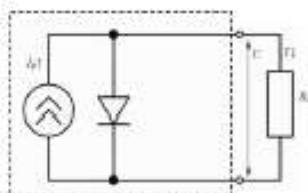


Рис. 2 Спрощена схема сонячного елемента

Вона описується рівнянням [9]:

$$I = I_{\phi} - I_{\infty} \cdot (e^{\alpha U} - 1), \quad (2)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{q}{A k T}$$

Для визначення фотоструму I_{ϕ} використовувалася світлова ВАХ сонячного

елемента. За встановленим його значенням, можна обчислити фотострум за різних температур і освітленості [11]:

$$I_{\phi} = I_{\phi,н.у.} \cdot \frac{G}{G_c} + a_T \cdot (T - T_c), \quad (3)$$

де $I_{\phi,н.у.}$ – фотострум, визначений за нормальних умов роботи, G – освітленість СЕ, G_c – освітленість за нормальних умов, при якій визначався $I_{\phi,н.у.}$ (2000 люкс), T_c – температура за нормальних умов (20 °С), T – температура СЕ, a_T – температурний коефіцієнт фотоструму.

Зворотний струм насичення діоду I_{∞} та параметр α обчислювалися за прямою гілкою темної ВАХ. Дана ВАХ описується рівнянням:

$$I = I_{\infty} \cdot (e^{\alpha U} - 1). \quad (4)$$

При струмах $I \gg I_{\infty}$ залежність $\ln(I) = f(U)$ представляє пряму, тангенс кута нахилу якої рівний α , а відрізок, що відсікається від осі ординат, дає значення $\ln(I_{\infty})$.

Таким чином, виміривши пряму і зворотну ВАХ, можна отримати наближену модель СЕ, значення параметрів якої залежать від освітленості та температури.

Точка максимальної потужності розраховуватиметься з використанням максимуму залежності:

$$P = I \cdot U = U \cdot (I_{\phi} - I_{\infty} \cdot (e^{\alpha U} - 1)). \quad (5)$$

IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА

Експериментальна установка складається з керувального пристрою (мікроконтролер STM32F401RE), цифро-аналогового перетворювача, схеми перетворення напруга-струм, вимірювача струму і напруги, досліджуваного зразка та ноутбука із середовищем графічного програмування LabVIEW. Блок-схема установки наведена на рис. 3. Дослідження проводяться на полікристалічному сонячному модулі потужності 0,7 Вт.

Як керувальний пристрій використовувався відладочний модуль STM32F401RE Nucleo. Даний блок забезпечує керування ЦАП, датчиком струму INA226, підключенням схеми для вимірювання світлової чи темної ВАХ, а також запис і збереження в комп'ютері даних, отриманих від датчиків.

Цифрове значення напруги від STM32 передається на ЦАП AD5624R по інтерфейсу SPI. AD5624R – 12 бітний чотирьохканальний ЦАП з вбудованою опорною напругою 2,5 В [12]. В даній конфігурації забезпечується точність керування напругою у 1,2 мВ. При цьому точність задання струму – 40 мкА.

Для вимірювання напруги на зразку та струму, що протікає крізь зразок, використовувався датчик INA226 [13]. Датчик вмикється в схему послідовно. Струм вимірюється як падіння напруги на шунтовому

Змн.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата

резисторі, що під'єднується до відповідних входів датчика, за допомогою вбудованого 16 бітного АЦП. В даній схемі використовується шунтовий резистор опором в 0,1 Ом, що дозволяє вимірювати струм до

800 мА з роздільною здатністю у 25 мкА. Покази датчика були відкалібровані за допомогою прецизійного вольтметра В7-46.

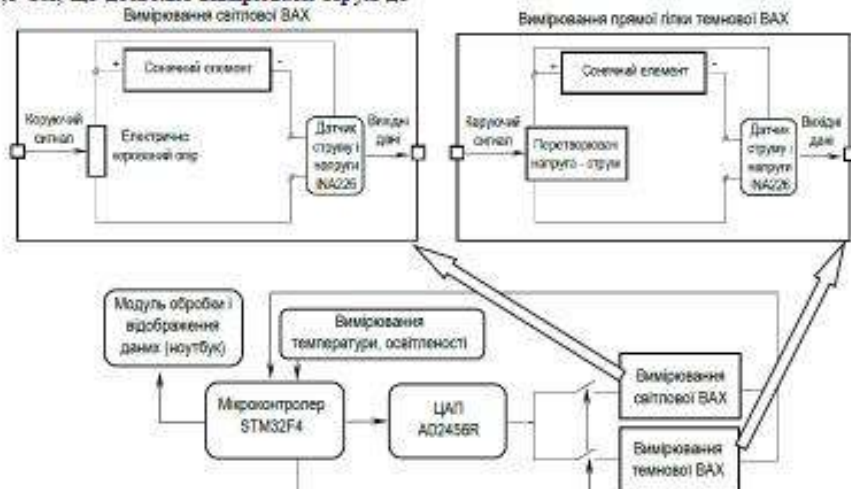


Рис. 3 Блок-схема установки для автоматизованого вимірювання параметрів СЕ

Як керований опір використовувався МОП-транзистор 2п7000. Освітленість вимірювалася датчиком GY-302, а температура – DS18B20.

Дані про вольт-амперну характеристику до комп'ютера надходять від мікроконтролера за протоколом UART. Для візуалізації і обробки даних був розроблений інтерфейс в програмі LabVIEW, що дозволяє будувати ВАХ в реальному часі і зберігати дані у файл. Вигляд передньої панелі приладу показано на рис. 4.

Дані про вольт-амперну характеристику до комп'ютера надходять від мікроконтролера за

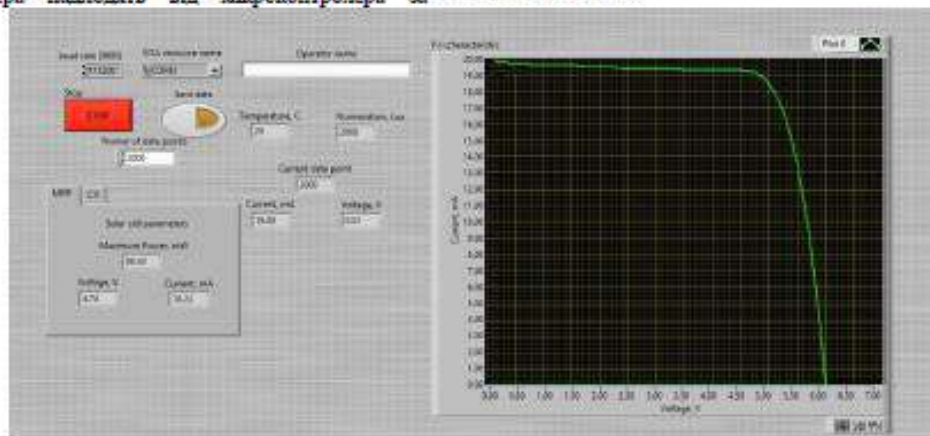


Рис. 4 Вигляд передньої панелі віртуального приладу для вимірювання ВАХ СЕ

V. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ

За допомогою описаної установки було отримано пряму гілку темної ВАХ (рис. 5).

Виміряна світлова ВАХ наведена на рис. 6 (ВАХ експериментальна). Значення фотоструму I_p за освітленості 2000 лк склали 19,8 мА. З отриманої експериментальної залежності видно, що точка максимальної потужності - 18,7 мА, 4,95 В, тобто 92,56 мВт.

Апроксимацію за методом найменших квадратів встановлено, що в напівлогарифмічному масштабі $\ln(I) = f(U)$ залежність можна описати прямою:

$$\ln(I) = 2,066 \cdot U - 16,195. \quad (6)$$

Тоді $\sigma = 2.066$ (Кл/Дж), $I_{sc} = 0.1$ (мкА).

Підставивши обчислені значення параметрів у (2), отримаємо рівняння моделі СЕ за освітленості 2000 лк і температури 20°C:

$$I = 19,8 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-6} (e^{2,066U} - 1). \quad (7)$$

ВАХ, що побудована за даним рівнянням, зображена на рис. 6 (ВАХ модельована). Змодельована ВАХ є наближеною до експериментально отриманої ВАХ.

Знайшовши максимум з рівняння:

$$P = U \cdot (19,8 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-6} (e^{2,066U} - 1)), \quad (8)$$

визначимо змодельоване значення точки максимальної потужності: 4,74 В, 18,23 мА - 86,43 мВт.

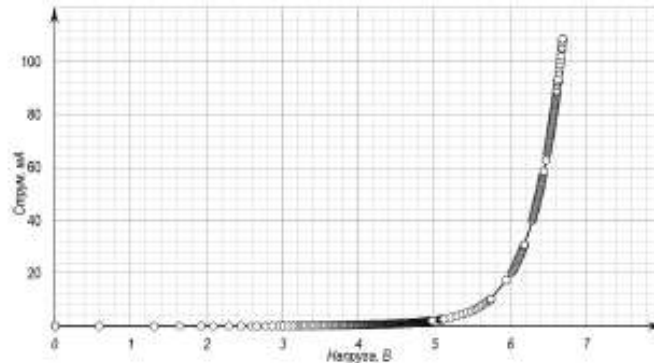


Рис. 5 Прямка гілка темної ВАХ

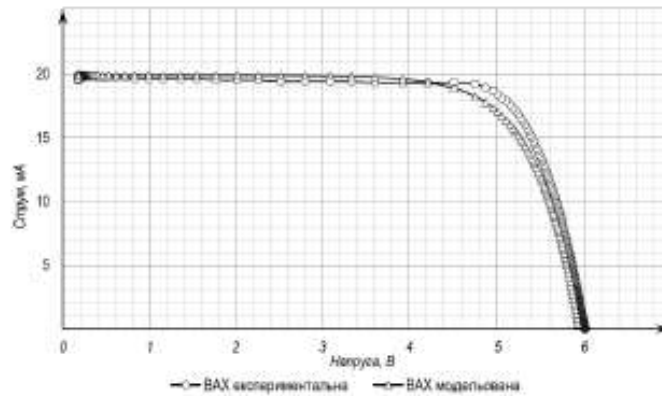


Рис. 6 ВАХ побудована за експериментальними даними (ВАХ експериментальна) та за розрахованою моделлю СЕ (ВАХ модельована)

Маючи інформацію про ТМП можливо розрахувати значення оптимального опору для досліджуваного СЕ і подати відповідний керувальний сигнал на перетворювач напруги від СЕ.

Отримане значення ТМП за ВАХ моделі відрізняється від експериментально визначеного на 6,6%, що свідчить про відповідність моделі реальному СЕ.

VI. ВИСНОВКИ

В роботі запропоновано підхід до слідування за ТМП з використанням рівняння моделі сонячного елемента. Розроблена установка для автоматизованого вимірювання ВАХ сонячних елементів, а також програма для обробки і зберігання

даних в середовищі LabVIEW. За виміряною ВАХ розраховуються параметри моделі СЕ, що надалі дозволяють обчислювати ТМП за різних значень температури і освітленості.

Змодельоване значення ТМП, обчислене за запропонованою методикою, незначно (6,6%) відрізняється від експериментального. На подальших етапах буде продовжено дослідження методів обчислення параметрів СЕ, що дозволить отримати більш точну модель СЕ.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] D. P. Holms and M. E. Ropp, "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms,"

- Progress in Photovoltaics: Research and Innovations, pp. 47 – 62, 2002, DOI: 10.1002/zip.459.
- [2] Van der Merwe L, van der Merwe G. "Maximum power point tracking—implementation strategies." Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 214–217, 1996.
- [3] Garrigos A. et al. "Real time estimation of photovoltaic modules characteristics and its application to maximum power point operation". Renewable Energy, pp. 1059 – 1076, 2007.
- [4] Koval O.S., Tyvanov M.S., "Opređelanye parametrov solnechnogo elementa iz eho svetovoi volt-ampernoj kharakterystyky [Determination of parameters of a solar cell from its light current-voltage characteristic]." Vestnyk BHU, Ser. 1, №2, pp. 39 – 44, 2012.
- [5] Boiko B.T. et al., "Plivkovij fotoelektrychnij peretvornivach na osnovi CuGaSe2 [Film photovoltaic converter based on CuGaSe2]." Fizyka i Khimija Tverdoho Tila T. 2, №4, pp. 549 – 558, 2001.
- [6] Lyhachov V.A., Popov A.Y., Laboratornaia robota "Spektralnaia chuvstvyvost' i volt - ampornaia kharakterystyky solnechnogo elementa [Spectral sensitivity and volt - ampere characteristic of a solar cell]" po kursu "Fizyka y tekhnolohyia pryborov osnovie nakrystalicheskikh poluprovodnykov" - M.: yzd-vo MFT, 1999.
- [7] Fedchukko T. V., Levnikov A. V. "Ekvivalentnaia skhema fotoelektrycheskogo elementa y ee parametry [Equivalent circuit of a photovoltaic cell and its parameters]", URL: <https://bit.ly/2VafGzQ>.
- [8] Atia Y., Zahran M., "A novel system for photovoltaic solar cell test and characteristic measurements." Engineering Research Journal, Vol. 32, №4, 2009.
- [9] Renshanbah G. "Spravochnik po proektirovaniyu solnechnykh baterей [Solar panel design guide]." Energoatomizdat, pp. 14-15, 1983.
- [10] Sharyfov B. N., Tarshulov T. R., "Modelirovaniye solnechnoi paneli v programme MATLAB/Simulink. [Modeling a solar panel in MATLAB / Simulink]" Vestnyk UTATU T. 19, № 4 (70), pp. 77 – 83, 2013. URL: <https://bit.ly/2VXKtaY>.
- [11] Trekhch A. M. "Modelirovaniye solnechnykh baterей v srede Matlab/Simulink [Simulation of solar panels in Matlab / Simulink environment]." Doklady BGUTR, №7 (69), pp. 111-115, 2012. URL: <https://bit.ly/2YzbtWX>.
- [12] Quad, 12-/14-/16-bit nanoDACs with 5 ppm/°C On-Chip Reference AD5624R/AD5644R/AD5664R, Data Sheet Rev. C, Analog Devices. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad5624_5664.pdf.
- [13] INA226 High-Side or Low-Side Measurement, Bi-Directional Current and Power Monitor with I²C Compatible Interface, Datasheet, Texas Instruments. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf>.

Автоматизированная система определения параметров модели солнечных элементов

Гуменюк Д. В., ORCID 0000-0002-2983-8312

e-mail: gumenyuk98@gmail.com

Кафедра конструирования электронно-вычислительной аппаратуры, Факультет электроники

КПИ им. Игоря Сикорского

Киев, Украина

Предложена автоматизированная система, позволяющая измерять световую и темновую вольт-амперную характеристику (ВАХ) солнечного элемента (СЭ). Измерение и обработка данных осуществляется с помощью виртуального прибора, созданного в среде LabVIEW. По полученным данным построена модель СЭ, что в дальнейшем может использоваться для определения точки максимальной мощности при разных уровнях освещенности и температуры. Предложен подход для вычисления параметров модели СЭ по ВАХ, на основе которого была определена точка максимальной мощности (ТММ) для солнечного модуля. Расхождение с экспериментальными данными составляет 6,6%.

Ключевые слова - альтернативная энергетика, солнечные элементы, автоматизированное определение параметров

Automated system for determining parameters of a solar cell model

Humeniuk D.V., ORCID 0000-0002-2983-8312

e-mail: gumenyuk98@gmail.com

Department of design of electronic digital equipment, Faculty of Electronics

NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Kyiv, Ukraine

ДК52.4 11734.001 ПЗ

Адк.

101

An automated system is developed, which allows measuring the light and dark current-voltage characteristics (CVC) of a solar cell (SC). It consists of a STM32 based control unit, a digital-to-analog converter, a voltage-current transformation circuit, a current and voltage sensor and a laptop with a LabVIEW graphical programming environment. The digital voltage value from STM32 is transmitted to the AD5624R DAC via the SPI interface. AD5624R is a 12 bit DAC with built-in reference voltage 2,5 V. In this configuration, the accuracy of the voltage control is 1,2 mV and the accuracy of the current setting is 40 μ A. INA226 sensor was used to measure the voltage on the sample and the current flowing through it. The current is measured as the voltage drop across the shunt resistor, which is connected to the corresponding sensor inputs, using the built-in 16-bit ADC. A shunt resistor with a resistance of 0.1 Ohm is used, which allows measuring the current up to 800 mA with a resolution of 25 μ A. The readings of the sensor were calibrated using the precision voltmeter B7-46. Measurement and data processing is carried out with a virtual device created in the LabVIEW environment. As a microcontroller, the SM32F401RE Nucleo development board was used. This unit provides control of the DAC, the current sensor INA226, connection of the circuit for measuring light or dark CVC, as well as recording and storing the data received from sensors in the computer. By measuring the light and dark current-voltage characteristics it is possible to obtain an approximate solar cell model, the parameters of which depend on the illumination and temperature. Solar cell light CVC is used to determine the photocurrent. By its value at a certain temperature and luminosity, it's possible to define the photocurrent at different temperatures and luminosity levels. The saturation current and the parameter α of the solar cell are calculated using the dark CVC. With the obtained data, a model of a solar cell is defined, which can be further used to determine the maximum power point at different levels of illumination and temperature. With information about the maximum power point, it is possible to calculate the optimal resistance value for the solar cell and to provide the corresponding control signal to the voltage converter. An approach for calculating the parameters of the SC model from its CVC is described and used to determine the MPP (maximum power point) of the solar cell module. The difference with the experimental data was 6.6%. In further research, the study of methods for calculating the parameters of the SC, which could provide a more accurate model, will be continued.

Keywords - alternative energy, solar cells, automated determination of parameters

Рекомендовано:

Яганов П.О., доцент, кандидат технічних наук
 piteryaharov@gmail.com
 "КПІ ім. Ігоря Сікорського", Факультет електроніки
 Київ, Україна

ДК52.4.11734.001 ПЗ

Адк.

102

Змн.	Адк.	№ док.им.	Підпис	Дата	

Період застос.	Поз. позначення	Найменування			Кіл.	Примітка	
Справ. №		<u>Конденсатори</u>					
	С1,С2	0805 50 В 100 нФ 5% X5R KEMET			2		
	С3,С4	0805 50 В 2.2 мкФ 5% X5R KEMET			2		
	С5,С6	0805 50 В 100 нФ 5% X5R KEMET			2		
	С7,С8	SMD В 16 В 10 мкФ 5% X5R VISHAY			2		
	С9-С13	0805 50 В 100 нФ 5% X5R KEMET			5		
	С14,С15	0805 50 В 20 нФ 5% X5R KEMET			2		
	С16,С17	0805 50 В 100 нФ 5% X5R KEMET			2		
	С18	0805 50 В 100 Ф 5% X5R KEMET			1		
	С19-С22	0805 50 В 100 нФ 5% X5R KEMET			4		
	С23	0805 50 В 0.1 мкФ 5% X5R KEMET			1		
	С24	0805 50 В 100 нФ 5% X5R KEMET			1		
	С25	0805 50 В 0.1 мкФ 5% X5R KEMET			1		
	С26	0805 50 В 100 нФ 5% X5R KEMET			1		
	Підп. та дата		<u>Мікросхеми</u>				
		DA1	L7809ABD2T-TR			1	
		DA2	KF33BDT-TR			1	
		DA3	REF3030AIDBZT			1	
DA4		AD8512 Analog Devices			1		
Інд. № дубл.	DA5	OP97 Analog Devices			1		
	DD1	STM32F303CB STMicroelectronics			1		
Взам. інд. №							
Підп. та дата	ДК52.4.11734.001 ПЗЗ						
	Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		
	Разраб.	Гуменюк Д.В.					
Інд. № пабл.	Проб.						
	Т.контр.						
	Н.контр.	Лисенко О.І.					
	Утв.	Яганов П.О.					
Вимірювач ВАХ сонячних елементів Перелік елементів					Літ. Аркуш Аркушів 1 3 КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕЛ, КЕОА, ДК-52		

Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
	<u>Реле</u>		
K1,K2	LQ12S Rayex	2	
	<u>Резистори</u>		
R1-R5	0805 0.125 Вт 10 кОм 5% Yageo	5	
R6	0805 0.125 Вт 100 кОм 5% Yageo	1	
R7	0805 0.125 Вт 100 Ом 5% Yageo	1	
R8	0805 0.125 Вт 100 кОм 5% Yageo	1	
R9-R10	0805 0.125 Вт 500 Ом 5% Yageo	1	
R11	0805 0.125 Вт 220 Ом 1% Yageo	1	
R12	0805 0.125 Вт 10 кОм 5% Yageo	1	
R13	0805 0.125 Вт 1 кОм 5% Yageo	1	
R14	0805 0.125 Вт 10 кОм 5% Yageo	1	
R15	0805 0.125 Вт 500 Ом 5% Yageo	1	
R16,R17	0805 0.125 Вт 10 кОм 5% Yageo	2	
R18	0805 0.125 Вт 500 Ом 5% Yageo	1	
R19,R20	0805 0.125 Вт 1.8 кОм 1% Yageo	2	
R21,R22	0805 0.125 Вт 10 кОм 5% Yageo	2	
R23	0805 0.125 Вт 500 Ом 5% Yageo	1	
R24	Through hole 0.5 Вт 100 кОм 5% SR Passives	1	
R25	0805 0.125 Вт 10 кОм 5% Yageo	1	
R26	Through hole 0.5 Вт 30 Ом 1% Yageo	1	
	<u>Потенціометри</u>		
RP1-RP3	Through hole 0.5 Вт 100 кОм 1% SR Passives	3	
	<u>Перемикачі</u>		
SA1-SA4	DTSM-61-NR DIPTRONICS	4	
SB1	SK12D07 ONON	1	

Підп. та дата	
Інв. № дубл.	
Взам. інв. №	
Підп. та дата	
Інв. № подл.	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ДК52.411734.001 ПЗЗ	Арк.
						2

Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
	<u>Діоди</u>		
VD1	FYLS-1206UGC FORYARD	1	
VD2,VD3	1N4148W-7-F Diodes Incorporated	2	
	<u>Транзистори</u>		
VT1	BC817-16.215 Nexperia	1	
VT2	FDD8896 ON	1	
VT3	BSH105 Nexperia	1	
VT4	BSH203 Nexperia	1	
VT5	BC817-16.215 Nexperia	1	
	<u>Роз'єми</u>		
XS1	6 position female header Preci-Dip	1	
XS2	3 Position Socket Connector Preci-Dip	1	
XS3,XS4	Terminal Block On Shore Technology	2	
XS5	3 position female header Preci-Dip	1	
XS6	5 position female header Preci-Dip	1	
XS7	KLS1-SD101 KLS electronic	1	
XS8	PLS-8 CONNFLY	1	
XS9	KF-301-500-2P KEFENG	1	
	<u>Кварцевий резонатор</u>		
ZQ1	HC-4.9U MEC	1	

Підп. та дата	
Інв. № дубл.	
Взам. інв. №	
Підп. та дата	
Інв. № лобл.	

						ДК52.411734.001 ПЗЗ	Арк.
							3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			

Перв. застос.	Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка	
					<u>Документація</u>			
	A1			ДК52.750706.001СК	Складальне креслення			
	A1			ДК52.4.11734.001ЕЗ	Схема електрична принципова			
	A4			ДК52.4.11734.001ПЕЗ	Перелік елементів			
Справ. №					<u>Деталі</u>			
			1	ДК52.758723.001	Плата друкована	1		
					<u>Інші вироби</u>			
					<u>Діоди</u>			
			2		1N4148W-7-F Diodes Incorporated	2	VD2, VD3	
			3		FYLS-1206UGC FORYARD	1	VD1	
					<u>Кварцевий резонатор</u>			
			4		HC-49U MEC	1	ZQ1	
					<u>Конденсатори</u>			
			5		SMD B 16 B 10 мкФ 5% X5R VISHAY	2	C7, C8	
			6		0805 50 B 0.1 мкФ 5% X5R KEMET	24	C1-C6	
							C9-C26	
Підп. та дата	ДК52.4.11734.001 СП							
	Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Інв. № подл.	Розроб.	Гуменюк Д.В.				Літ.	Аркуш	Аркушів
	Перев.						1	3
	Т. контр.					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕЛ, КЕОА, ДК-52		
	Н.контр.	Лисенко О.І.						
	Затв.	Яганов П.О.						
Вимірювач ВАХ сонячних елементів								
Специфікація								

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				<u>Мікросхеми</u>		
		7		L7809ABD2T-TR	1	DA1
		8		KF33BDT-TR	1	DA2
		9		REF3030AIDBZT	1	DA1
		10		AD8512 Analog Devices	1	DA2
		11		OP97 Analog Devices	1	DA4
		12		STM32F303CB STMicroelectronics	1	DD1
				<u>Перемикачі</u>		
		13		DTSM-61-NR DIPTRONICS	4	SA1-SA4
		14		SK12D07 ONON	1	SB1
				<u>Потенціометри</u>		
		15		Through hole 0.5 Вт 100 кОм 1%	2	RP1-RP3
				SR Passives		
				<u>Пристрій індикації</u>		
		16		162A Displaytech Ltd.	1	HG1
				<u>Резистори</u>		
		17		0805 0.125 Вт 10 кОм 1% Yageo	21	R1-R5
						R7,R8
						R11-R23
						R25
		18		Through hole 0.5 Вт 100 кОм 1%	1	R6
				SR Passives		
		19		Through hole 0.5 Вт 30 Ом 1% Yageo	2	R10,R26

Підп. та дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

Підп. та дата

Інв. № подл.

ДК52.4 11734.001 СП

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
		20		Through hole 0.5 Вт 100 кОм 1%	2	R9,R24
				SR Passives		
				<u>Реле</u>		
		21		LQ12S Rayex	2	K1,K2
				<u>Роз'єми</u>		
		22		3 position female header Preci-Dip	1	XS5
		23		3 Position Socket Connector Preci-Dip	1	XS10
		24		5 position female header Preci-Dip	1	XS6
		25		5 position male header Preci-Dip	1	XS2
		26		6 position female header Preci-Dip	1	XS1
		27		KF-301-500-2P KEFENG	1	XS9
		28		KLS1-SD101 KLS electronic	1	XS7
		29		PLS-8 CONNFLY	1	XS8
		30		Terminal Block On Shore Technology	2	XS3,XS4
				<u>Транзистори</u>		
		31		BC817-16.215 Nexperia	2	VT1,VT5
		32		BSH105 Nexperia	1	VT3
		33		BSH203 Nexperia	1	VT4
		34		FDD8896 ON	1	VT2
				<u>Матеріали</u>		
		35		Лак УР-231 ТУ 6-21-14-90	20 мл	
		36		ГОСТ 61 ГОСТ 21930-76	10 з	

Підп. та дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

Підп. та дата

Інв. № подл.