

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

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності (спеціалізації) _____
(код і назва)

на тему: Вимірювач ВАХ сонячних елементів

Виконав студент IV курсу, групи ДП-51
(шифр групи)

Горянін Володимир Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник _____
доц., к.т.н. Бовтун Віктор Петрович

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

(підпис)

Консультант з нормоконтролю _____

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н. Діденко Ю.В.

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2018 року

РЕФЕРАТ

Дипломну роботу викладено на 48 сторінках. Вона містить 3 розділів, 22 рисунки, 4 таблиці та 16 джерел в списку використаної літератури.

Ключові слова: сонячний елемент, фотоелектричний перетворювач, вольт-амперна характеристика, вимірювання параметрів, вимірювальна схема, PSoC 4, терморегулятор.

Об'єктом дослідження стала реалізація вимірювання параметрів фотоелектричних перетворювачів.

Мета роботи – модернізація існуючих засобів вимірювання вольт-амперних характеристик сонячних елементів та їх проектування.

В даній роботі описані різновиди сучасних фотоелектричних перетворювачів, вирази для обрахунку параметрів та методика їх вимірювань. Детально обгрунтований принцип функціонування простого монокристалічного фотоелектричного перетворювача. Описаний вплив різних факторів на фотоелектричний перетворювач. Проведений аналіз аналогічних до проєктованого вимірювача приладів. Виділений основний функціонал представлених вимірювачів зарубіжних виробників. Зроблені висновки та надані рекомендації щодо конструкції пристрою. Описана будова складових вимірювача, котрий пропонується, схема алгоритму виконання вимірювань.

Результати роботи можуть бути застосовані для створення вимірювача вольт амперних харктеристик та температурних коефіцієнтом, із можливістю налаштування системи під вимірювання зразків іншого типу та модернізації складових вимірювача.

ANNOTATION

Bachelors thesis is presented on 48 pages. It consists of 3 parts, 22 figures, 4 tables and 16 sources in the list of used literature.

Keywords: solar cell, photo-voltaic converter (PV), current-voltage characteristic, measurement of parameters, measurement scheme, PSoC 4, temperature regulator.

Realization Of measurement solar cell parameters photo-voltaic sells is the object of research.

The purpose of the work is upgrading of existing CVC measurement instruments and its designing.

Different types of modern photo-voltaic converters, expressions for parameters calculation and the methodics of measurement are described in this work. Principle of functioning of simple monocrystalline PV converter is well-grounded. The influence of various factors on the PV converter is described. The analysis of analogous to the projected meter of devices is carried out. The main functionality of the presented meters of foreign manufacturers is highlighted. Conclusions and recommendations on the design of the device have been made. The structure of the components of the meter, which is proposed, describes the scheme of the measurement algorithm.

The results of the work can be applied to create a meter of voltage ampere characteristics and a temperature coefficient, with the possibility of setting the system for measuring other types of samples and upgrading the components of the meter.

ЗМІСТ	4
РОЗДІЛ 1 Теоретична частина.	8
1.1. Типи сонячних елементів	8
1.2. Будова сонячного елемента.	10
1.3. Вольт-амперна характеристика ідеального сонячного елемента.	12
1.4. Фактори впливу на ВАХ сонячного елемента.	14
1.5. Особливості вимірювання вольт-амперної характеристики сонячних елементів. 17	
Висновки:	22
РОЗДІЛ 2 Огляд сучасних тестерів	24
2.1 Аналіз параметрів промислових тестерів.	24
Висновки:	32
РОЗДІЛ 3 Проектна частина	33
3.1 Обґрунтування вимірювальної схеми.	33
3.2 Обробка сигналів.	35
3.3 Реалізація імітатора сонячного випромінювання.	37
3.4 Будова терморегулятора.	40
3.5 Принцип функціонування тестера	41
Висновки:	47
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	48

ВСТУП

Сильний попит на альтернативи джерел енергії на основі викопного палива та збільшення екологічних проблем збільшили зацікавленість в сонячних панелях як у довгострокової, невичерпної, безпечної для довкілля та надійної енергетичної технології. Тривалі зусилля на розробку сонячних панелей різного типу були докладені для того, щоб виготовити сонячні панелі покращеної ефективності нижчої вартості, цим самим скориставшись великою кількістю вільної сонячної енергії. Збільшення інтересу до фотоелектричних перетворювачів призвело до масових досліджень та робіт по модернізації та розробці нових зразків.

Для контролю якості та ефективності сонячного елемента на виробництві або в лабораторних умовах необхідно точно виміряти його вольт-амперну характеристику, яка є основним джерелом інформації про параметри та характеристика сонячного елемента. На неї впливають як оптичні, так й електрофізичні властивості напівпровідника. Лише детальний аналіз дозволяє визначити ту чи іншу причину недостатнього рівня коефіцієнта корисної дії певного зразка сонячного елемента.

Кожен сонячний елемент характеризується такими параметрами як: струм короткого замикання, напруга холостого ходу, максимальний струм, максимальна напруга, максимальна потужність, коефіцієнт заповненості ВАХ, послідовний опір, шунтуючий опір. Позначаються як

$I_{sc}, U_{oc}, I_m, U_m, P_m, FF, R_s, R_{sh}$ відповідно.

Для вимірювання цих параметрів на практиці застосовують спеціальні тестери сонячних елементів. Суть такого пристрою полягає в вимірюванні параметрів сонячних елементів при освітленні штучним джерелом світла, при цьому елемент підключається до електричного кола тестера, яке в свою чергу разом із джерелом світла керується мікроконтроллером. Далі дані обробляються та виводяться на комп'ютер.

При експлуатації навіть не концентраторних сонячних елементів температура останніх може коливатись в діапазоні від -30 до $+200^{\circ}\text{C}$ [3]. А при збільшенні температури сонячного елемента на кожні 10°C , коефіцієнт корисної дії зменшується приблизно на 4%. Тому температура є важливим фактором, на який слід звернути увагу при проектуванні та випробовуванні нових зразків сонячних елементів, і не тільки. Саме для аналізу температурних режимів експлуатації сонячних елементів в тестери сонячних елементів додають спеціальні системи для нагрівання (іноді доповнюють системами для охолодження), щоб виміряти коефіцієнти температурної залежності напруги холостого ходу α , струму короткого замикання β та максимальної потужності γ .

Широкий діапазон досліджень в галузі матеріалів та різних зразків фотоелектричних перетворювачів потребує точного визначення основних параметрів сонячних елементів. Існуюче обладнання із високоточним вимірюванням параметрів мають велику ціну та не завжди раціональне для малих лабораторій.

Велика увага в галузі відновлюваних джерел енергії приділяється засобам та методам, за допомогою яких вимірюються параметри сонячних елементів. Причиною цього є потреба в точному контролі та відповідності експлуатаційним вимогам фотоелектричних перетворювачів. Адже за допомогою вимірювань параметрів можна зробити висновки про якість та дефективність сонячного елемента.

В даній роботі буде розроблено бюджетний вимірювач вольт-амперних характеристик сонячних елементів. За основу взятий пристрій, котрий описаний в [1]. Ціллю даної роботи є модернізація існуючих засобів для вимірювання ВАХ фотоелектричних перетворювачів, шляхом здешевлення конструкції та додавання нових функцій. Особливою відмінністю приладу, який проектується – можливість вимірювання температурних залежностей параметрів сонячних елементів. Такий прилад доцільно використовувати в невеликих лабораторіях. За допомогою можливості зміни вимірювальної схеми та конфігурації мікроконтролера можна перелаштувати весь прилад під

вимірювання фотоелектричного перетворювача іншої конструкції та типу. Завдяки своїй модульності, вимірювальну систему можна модернізувати, шляхом зміни її складових: вимірювальної схеми, імітатора сонячного випромінювання та приладу для зміни температури вимірюваного зразку сонячного елемента.

РОЗДІЛ 1 Теоретична частина.

1.1. Типи сонячних елементів

Класифікація промислових сонячних елементів відбувається по їх конструктивним особливостям, по призначенню та типу робочого фотоелектричного слою. За конструктивними особливостями розрізняють такі типи сонячних елементів:

- гнучкі;
- жорсткі.

За призначенням розрізняють такі типи:

- перетворення світла електроенергію;
- перетворення концентрованого світла в електроенергію;
- перетворення світла в тепло;
- перетворення світла і тепла в електроенергію.

За типом робочого фотоелектричного слою можна виділити такі різновиди:

- Кремнієві монокристалічні, полікристалічні та аморфні;
- телурид-кадмієві;
- на основі індій-купрум-галію;
- полімерні;
- органічні;
- арсенід-галієві;
- комбіновані та багатошарові.

Гнучкі тонко плівкові сонячні елементи все більше привертають увагу на ринку завдяки своїй монтажній універсальності, адже їх можна встановлювати на поверхні різної геометричної форми.

Великий попит широкого кола користувачів в основному спрямований на монокристалічні та полікристалічні елементи, а не на всі типи. Хоча деякі зразки інших типів сонячних перетворювачів й мають більший показник ККД, але вони не є рентабельними через свою ціну та ресурс.

Тип	ККД
Кремнієві	
Si (монокристалічний)	24,7
Si (полікристалічний)	20,3
Si (тонкоплівковий)	16,6
Із напівпровідників III-V груп	
GaAs (монокристалічний)	25,1
GaAs (тонкоплівковий)	24,5
GaAs (полікристалічний)	18,2
InP (монокристалічний)	21,9
Тонкі плівки халькогенідів	
CIGS	19,9
CdTe	16,5
Аморфний та нанокристалічний кремній	
Si (аморфний)	9,5
Si (нанокристалічний)	10,1
Фотохімічні	
На основі органічних барвників	10,4
Органічні	
Органічний полімер	5,15
Багатошарові	
GaInP/GaAs/Ge	32
GaInP/GaAs	30
GaAs/CIS (тонкоплівковий)	25,8

Таблиця 1. Типи сонячних елементів та їх ККД.

На сьогодні переважна більшість сонячних елементів виготовляється із кристалічного кремнію, тому далі під терміном «сонячний елемент» буде матися на увазі саме кристалічний кремнієвий сонячний елемент.

1.2. Будова сонячного елемента.

Сонячний елемент – електричний пристрій, який діє як перетворювач, служить для перетворення частини світлової енергії (як правило, видимих і інфрачервоних електромагнітних хвиль) у електричну за допомогою фотоелектричного ефекту. Сонячні елементи являють собою напівпровідниковий діод, який складається з p - n переходу та омичних контактів. На рисунку 1.1 зображена будова фотоелемента.

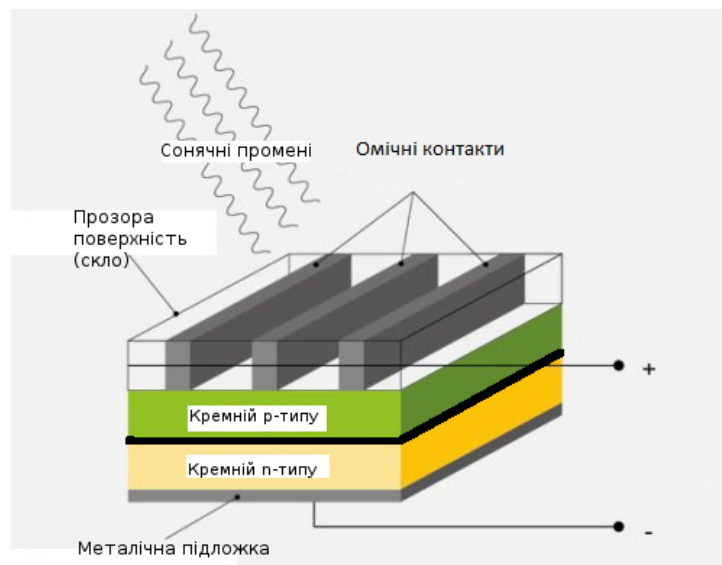


Рис.1.1. Будова сонячного елемента.

Як видно з рисунку, омичні контакти разом із металічною підложкою служать для руху заряду. При чому омичні контакти повинні займати якомога менше площі, щоб підвищити процент площі активної області. Активна область складається з двох областей, кожна з яких являється напівпровідником певного типу провідності: p та n . Перший характеризується легованою домішкою третьої групи таблиці Менделєєва, атоми якої мають менше електронів на зовнішньому рівні, в наслідок чого не вистачає електрона для встановлення електронних зв'язків між атом домішки та напівпровідника. Це призводить до створення вакансії, або дірки. Дірку можна розглядати як місце відсутності електрона. Носії заряду в напівпровіднику розділяють на основні та неосновні. Основними в p -типі є дірки, в n -типі – електрони. Неосновні – навпаки.

Якщо уявити собі ідеальну ситуацію в якій зєднують без проміжкового шару два напівпровідника різного типу провідності, то в наслідок різної кількості дірок та електронів в областях, із області n у область p вони почнуть рухатись електрони, а із області p у область n – дірки.

Сонячний елемент – фотодіод, у якого при опроміненні електромагнітною хвилею певних параметрів область переходу двох напівпровідників різного типу провідності відбувається поглинання енергії хвилі електроном, в наслідок чого генерується електронно діркова пара, яка і є складовою струму.

Принцип дії сонячних елементів: електромагнітна хвиля, енергія якої більша або рівна ширині забороненої зони E_g переходу, генерує в області переходу електронно-діркову пару, шляхом поглинання електроном кількості енергії хвилі, пропорційній ширині забороненої зони E_g , та переходом його із шару p в шар n (дірки ж навпаки, із шару n в шар p), за рахунок чого змінюється концентрація електронів та дірок та на виводах з'являється напруга. Залишкова частина енергії таких фотонів розсіюється у вигляді тепла. Коли на сонячний елемент падає сонячне світло фотони, енергія яких менша за ширину забороненої зони E_g , не генерують пари носіїв заряду, нехтуючи домішковим поглинанням [6].

Рівняння енергетичного балансу [4]:

$$E_0 = hv - E_g$$

(1)

Де: h - постійна Планка, ν - частота хвилі падаючого світла, E_0 – надлишкова енергія фотона, E_g - ширина забороненої зони.

Неосновні, згенеровані оптичним випромінюванням, носії заряду розділяються полем переходу. Для основних носіїв заряду перехід – потенціальний бар'єр. Якщо поглинання світла відбулось в n -області на відстані меншій чим дифузійна довжина носіїв заряду від переходу, то неосновні носії заряду доходять до переходу та розділяються його полем. Якщо поглинання відбулось в p -області, то неосновні носії заряду, які знаходяться на відстані дифузійної довжини і менше, переносяться в n -область. Якщо

поглинання відбулось в області просторового заряду, то електрони відходять до n -області, а дірки до p -області. Таким чином потенціальний бар'єр діє як дільник носіїв заряду. Процес поділу носіїв є причиною накопичення основних носіїв: електронів в n -області та дірок в p -області. В наслідок цього між p та n областями виникає фото-ЕРС із протилежною полярністю відносно бар'єрного поля переходу [5].

1.3. Вольт-амперна характеристика ідеального сонячного елемента.

Сонячний елемент як електронний компонент – фотодіод. Фотодіод – діод, який перетворює оптичне випромінювання, яке падає на фоточутливу область, в електричний заряд і в якого зі зміною освітленості змінюється крива вольт амперної характеристики.

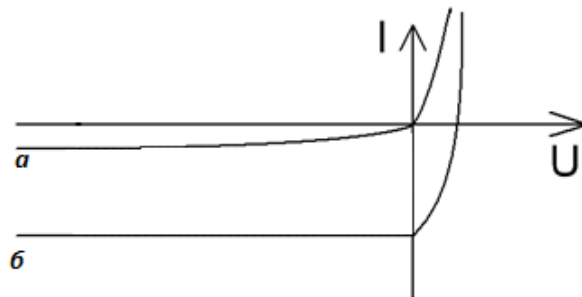


Рис. 1.2. Вольт-амперна характеристика: а – без освітлення, б – з освітленням.

Шунтуючий опір R_{sh} сонячного елемента визначає струм витоку на землю. Зазвичай він не є сильно впливовим, тому опір вважають нескінченно великим. Послідовний опір R_s описує втрати фотоелектричного перетворювача. Тому для ідеального сонячного елемента $R_s = 0, R_{sh} = \infty$. Відповідно, схема такого елемента матиме наступний вигляд:

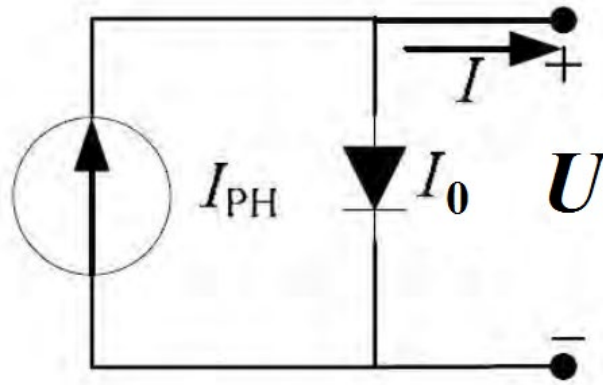


Рис.1.3. Еквівалентна схема ідеального сонячного елемента.

Рівняння, яке описує вольт-амперну характеристику такого елемента має вигляд [7]:

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{nkT}\right) - 1 \right]$$

(2)

Де: I – вихідний струм, I_{sc} – струм короткого замикання, I_0 - тепловий струм або струм зворотного насичення, U – напруга, n – діодний коефіцієнт або коефіцієнт ідеальності переходу або коефіцієнт не ідеальності діоду, e – заряд електрона, k - стала Больцмана, T – температура.

Для вимірювання вольт-амперної характеристики використовують дану схему:

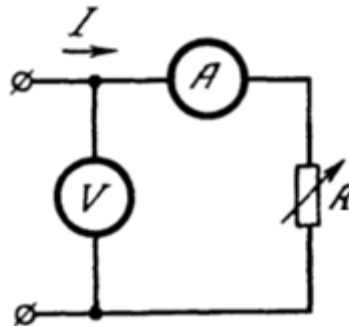


Рис.1.4. Вимірювальна схема сонячного елемента.

1.4. Фактори впливу на ВАХ сонячного елемента.

Ефективність роботи фотоелектричного перетворювача частково залежить від величини послідовно включених в ньому опорів, на яких розсіюється частина електричної потужності. При певних умовах присутній вплив шунтуючого опору, який пов'язаний із втратами через крайовий ефект на поверхні, на границі зерен, кристалічних дефектах та дислокаціях. Також, на технологічному етапі виробництва при напиленні металічних контактів на поверхню сонячного елемента, метал може осідати в мікротріщини та утворювати провідні області, які в свою чергу будуть закорочувати контакти. На рисунку 1.4 зображена електрична схема заміщення сонячного елемента підключеного до навантаження R .

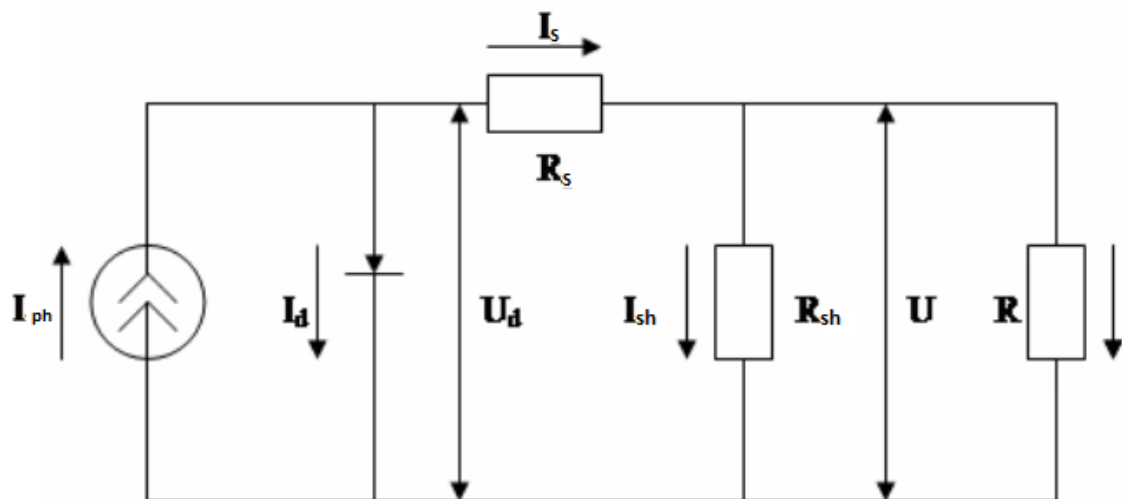


Рис.1.5. Електрична схема заміщення СЕ.

R_s (послідовний опір) включає наявність розподілених опорів бази, емітера та контактних переходів. R_{sh} (шунтуючий опір) замикає струм через внутрішні ланцюги навантаження. Струм короткого замикання зменшується із зростанням величини послідовного опору і не залежить від шунтуючого. Напруга холостого ходу не залежить від послідовно опору і зменшується із зменшенням шунтуючого опору до величини відношення напруги холостого

ходу до фотоструму I_{ph} [8]. Тому вираз залежності напруги від струму набуває наступного вигляду:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \frac{e(U + IR_s)}{nkT} - 1 \right] - \frac{(U + IR_s)}{R_{sh}} \quad (3)$$

Де: R_s - послідовний опір, R_{sh} - шунтуючий опір.

Вираз для знаходження коефіцієнту корисної дії [2]:

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot U_{oc}}{P} \quad (4)$$

Де: η – коефіцієнт корисної дії, FF - коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики, I_{sc} - струм короткого замикання, U_{oc} - напруга холостого ходу, P - потужність сонячного випромінювання.

Вираз для знаходження коефіцієнту заповнення вольт-амперної характеристики FF :

$$FF = \frac{I_m \cdot U_m}{I_{sc} \cdot U_{oc}} \quad (5)$$

Де: I_m - струм при максимальній потужності, U_m - напруга при максимальній потужності.

Окрім вищезгаданих параметрів на ефективність роботи сонячного елемента впливають параметри матеріалів, на основі яких він створений, втрати на відбиття сонячного випромінювання та наскрізного проходження без перетворення, поверхневою та об'ємною рекомбінацією генерованих носіїв заряду.

Ще одним суттєвим фактором який впливає на вимірювання є структурні дефекти, які суттєво впливають на тривалість життя носіїв заряду і питомий опір матеріалу. Вони утворюються як на етапі виробництва, так і під впливом сонячної радіації та тривалого часу. Наслідком цього є зміна вольт-амперної характеристики сонячного елемента. Дефекти викликають збільшення струмів

витоків, призводять до появи локального пробою р-п переходу, неоднорідності фронту дифузії домішок, обриву металізації, проколів оксиду, що в свою чергу призводить до деградації сонячного елемента, а також зниження надійності.

Також на роботу фотоелектричного перетворювача впливає температура. Із підвищенням температури зменшується ширина забороненої зони, що спричиняє ряд змін: змінює значення напруги та струму на контактах сонячного елемента, напруга холостого ходу зменшується через температурну залежність I_0 , потужність зменшується. Причиною цього є зменшення кількості енергії, яку потрібно отримати електронам у валентній зоні для переходу у зону провідності. Вираз теплового струму I_0 через р-п перехід матиме наступний вигляд:

$$I_0 = \frac{I_{sc,су} + \alpha(T - T_{су})}{\exp\left[U_{oc,ту} + \frac{\beta(T - T_{су})}{\frac{e}{\alpha k T}}\right] - 1}$$

(6)

Де:

$I_{sc,су}$ – струм короткого замикання за стандартних умов;

α – температурний коефіцієнт струму короткого замикання;

T – температура сонячного елемента;

$T_{су}$ – температура за стандартних умов;

$U_{oc,ту}$ – напруга холостого ходу за стандартних умов;

β – температурний коефіцієнт напруги холостого ходу.

Фотострум I_{ph} сонячного елемента змінюється в залежності від температури, освітленості, температурного коефіцієнту струму короткого замикання та струму короткого замикання при стандартних умовах (STC (Standart Test Conditions) температура - 25°C, щільність потоку світла – 1000Вт/м²). Розрахувати його значення можна за допомогою наступного виразу[9]:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{су}} [I_{sc,су} + \alpha(T - T_{су})]$$

(7)

Де:

G – щільність потоку світла [$\text{Вт}/\text{м}^2$];

α – температурний коефіцієнт струму короткого замикання;

G_{CY} – щільність потоку світла за стандартних умов;

$I_{\text{sc,CY}}$ – струм короткого замикання за стандартних умов;

T_{CY} – температура за стандартних умов.

Зазвичай температурні коефіцієнти α та β завчасно відомі та визначені виробником сонячного елемента. Послідовний та шунтовий опір визначається за допомогою наступних виразів:

$$R_s = - \left(\frac{dU}{dI} \right)_{U=U_{oc}} \quad (8)$$

$$R_{sh} = - \left(\frac{dU}{dI} \right)_{I=I_{sc}} \quad (9)$$

1.5. Особливості вимірювання вольт-амперної характеристики сонячних елементів.

Для того, щоб якомога точно виміряти параметри потрібно відтворити реальні умови. Альтернативою сонячного випромінювання є спеціальні лампи. На практиці, при використанні сонячних елементів, умови досить часто змінюються та є різними в різних кліматичних зонах планети. Тому вдалися до стандартизації вимірювань. Сонячне випромінювання характеризується такими параметрами, як щільність потоку світла та спектральний склад. За стандартних умов STC (Standart Test Conditions) температура - 25°C , щільність потоку світла – $1000\text{Вт}/\text{м}^2$, спектр сонячного випромінювання – AM1.5 [10].

Спектральний склад – це розподіл сонячного випромінювання за довжинами хвиль. Він характеризується поняттям атмосферної маси (AM) та

числом. Наприклад спектральний склад АМ0 відповідає спектру сонячного випромінювання за межами атмосфери, тобто в космосі. Спектральний склад АМ1 відповідає сонячному випромінюванню, яке пройшло крізь атмосферу та є перпендикулярним до поверхні землі, відповідно АМ1.5 – під кутом 45° та пройшло крізь півтори атмосфери.

У зв'язку із значною чутливістю сонячних елементів до температури, вимірювання прийнято проводити за температури 25°C. Тому, щоб на температуру вимірюваного зразку не впливало випромінювання, використовують імпульсний метод вимірювання, який являє собою практично миттєве вимірювання вольт-амперної характеристики, під час якого елемент не нагрівається. Деякі тестери розроблені з урахуванням можливості варіювання температури досліджуваного зразку за допомогою нагрівача та термоелементу Пельт'є. Це дозволяє виміряти температурні залежності параметрів сонячного елементу. Інтенсивність світового потоку під час одного з кількох вимірювальних імпульсів змінюється не значно, що мінімізує похибку в порівнянні з іншими методами.

Важливим в тестерах є досягнення найбільш наближеного до сонячного випромінювання потрібного спектру (АМ0, АМ 1, АМ1.5). Спектр залежить від обраного джерела випромінювання. Для тестерів застосовують такі типи джерел світла:

1. Лампи розжарювання. В таких лампах температура нитки розжарювання досягає значення близько 3200К. Хоча існує деяка розбіжність між колірною температурою лампи та сонця. Значення останньої – 5800К. Значна перевага – дешевизна.
2. Металогалогенні лампи. Такі джерела світла дозволяють отримати схожий на сонячний спектр випромінювання. Колірна температура таких ламп може досягати близько 5800К. Недоліком такої лампи є висока вартість та складність у фільтруванні ряду ліній спектру, які не відповідають сонячному.

3. Ксенонові лампи. Цей тип джерела має спектральний розподіл найбільш наближений до розподілу АМ0, а при використанні спеціальних фільтрів можна легко отримати спектр АМ1.5. Недоліком є велика вартість.

Згідно з [11], розподіл сумарного сонячного випромінювання по діапазону спектрів характеризує процентну долю кожного із них в діапазоні 400-1100нм.

Таблиця 2. Процентна доля діапазонів спектру від всього діапазону (400-1100).

Діапазон спектру, нм	Процентна доля в сумарному сонячному опроміненні в діапазоні 400-1100нм, %
400-500	18.4
500-600	19.9
600-700	18.4
700-800	14.9
800-900	12.5
900-1100	15.9

Класифікують імітатори трьома класами: А, В та С. Існують критерії по яким визначають клас: спектральна відповідність, нерівномірність розподілу випромінювання на робочій поверхні та короткочасова нестабільність випромінювання за один цикл реєстрації даних.

Таблиця 3. Класифікація імпульсних сонячних імітаторів.

Клас критерія	Спектральна відповідність для усіх діапазонів вказаних в таблиці 1	Нерівномірність випромінювання	Короткочасова нестабільність

A	0.75-1.25	2%	0.5%
B	0.6-1.4	5%	2%
C	0.4-2.0	10%	10%

Спектр лампи можна відрегулювати інтерференційними оптичними фільтрами. Але щоб досягти спектру AM1.5 потрібно докласти неабияких зусиль. Адже інтенсивність випромінювання та спектр залежать від великої кількості факторів. Задля зменшення відхилень при вимірюванні слід врахувати деякі фактори, а саме:

- освітленість має бути точно визначена та постійна, рівномірно розподілена по поверхні зразку та мати низьке кутове відхилення;
- спектральний розподіл має якомога більше відповідати сонячному;
- температура також повинна контролюватись.

Для забезпечення однорідного світлового потоку на поверхні зазвичай використовують один із двох методів: використання оптичної системи, яка розділяє світловий пучок, багаторазово відбиває та розсію на поверхню або точкові джерела випромінювання (одне або декілька). Така оптична система називається коліматор. Але на практиці необхідно часто контролювати та відлаштовувати обладнання, враховувати вплив елементів системи на спектральний розподіл за допомогою додаткової фільтрації. Він створює паралельність променів за рахунок параболоїдних дзеркал та системи лінз.

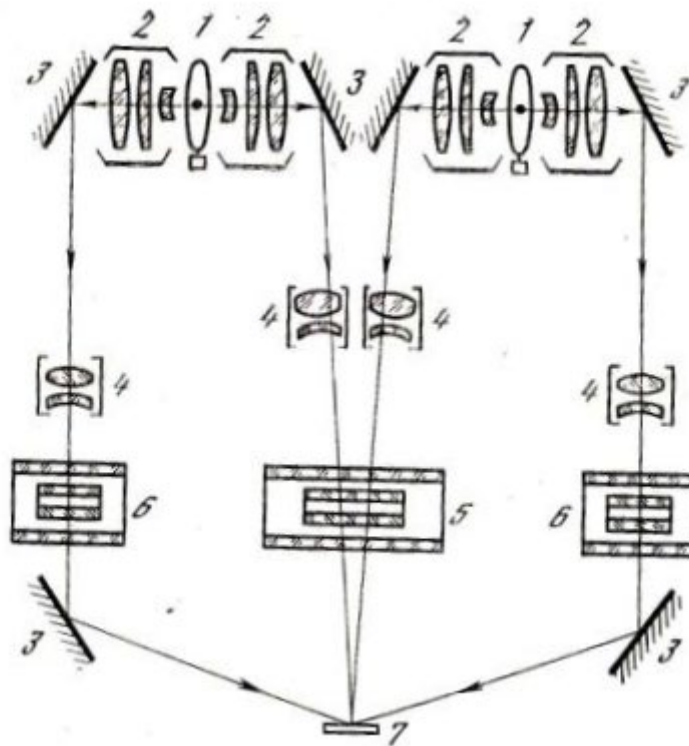


Рис. 1.6 Оптична схема коліматора: 1 – джерело випромінювання; 2 – система оптичних лінз; 3 – плоскі відбивачі; 4 – об’єктиви; 5,6 – світлофільтри; 7 – вимірюваний сонячний елемент.

Також існує два методи вимірювання вольт-амперної характеристики. Перший відбувається за постійного освітлення. Як наслідок, можливе нагрівання вимірюваного зразка та неточність в обчисленнях. Другий метод являє собою короткочасне засвічення вимірюваного зразку імпульсом світла. За таких обставин вимірюваний зразок не встигає змінити температуру, а вимірювання тривають менше, аніж сам спалах, в результаті яких описується крива вольт-амперної характеристики.

Тестери часто додатково обладнують еталонним сонячним елементом, який підключається до системи вимірювання та дозволяє контролювати освітленість при вимірах, адже вона не постійна.

Нижче зображена залежність освітленості сонячного елемента від часу при імпульсному методі при опроміненні лампою.

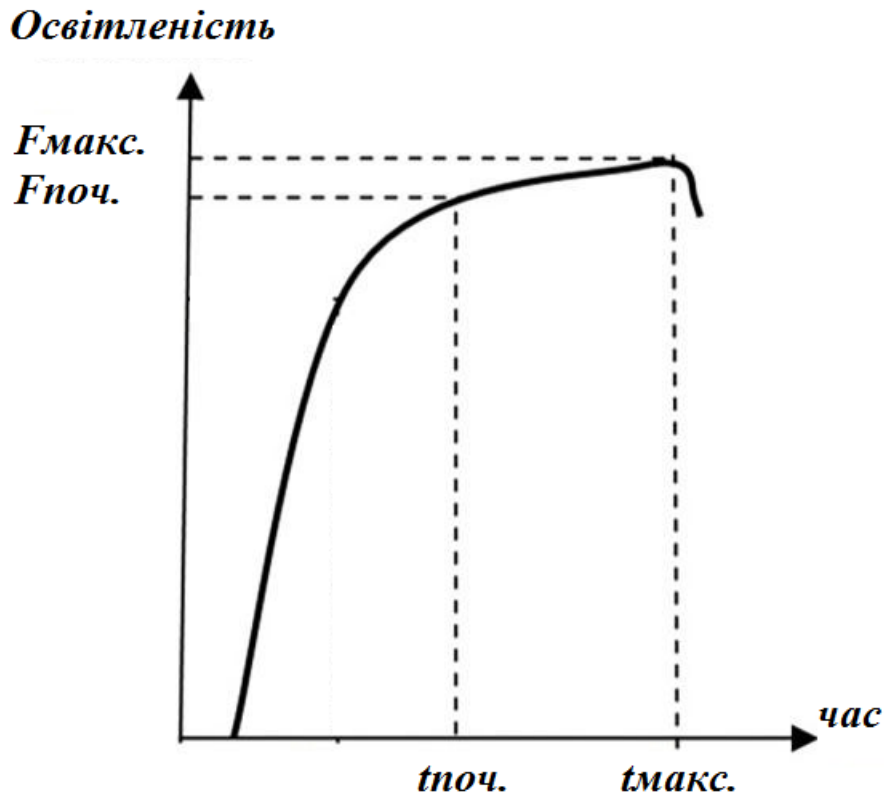


Рис. 1.7 Графік залежності вимірної освітленості від часу (на якому вказані точки початку вимірювання в зоні незначної зміни освітленості та його закінчення).

Освітленість, при якій починається вимірювання обирається такою, щоб виконувалась умова: $F_{\text{макс.}} - F_{\text{поч.}} \sim 0.05F_{\text{макс.}}$

Терморегулятором встановлюють температуру на рівні 25°C та, змінюючи відстань від лампи до поверхні сонячного елемента, добиваються еталонних значень струму та напруги, які завчасно відомі. Якщо ж тестер не обладнаний терморегулятором, то вимірні параметри при довільній температурі за допомогою формул перераховують у стандартні умови. Але такий спосіб включає похибку при обчисленні, тому є менш точним.

Висновки:

В даному розділі розглянута класифікація фотоелектричних перетворювачів, показаний коефіцієнт корисної дії багатьох сучасних зразків, які виробляються масово та використовуються за призначенням. На основі наведених даних можна сказати, що на даний момент найбільш ефективними та

економічно вигідними являються сонячні панелі виготовлені з монокристалічного кремнію. Також можна помітити, що приведені типи сонячних елементів, коефіцієнт корисної дії яких більший ніж у монокристалічних елементів, хоча насправді технологія їх виготовлення набагато дорожча, а срок експлуатації таких виробів значно менший. Показана будова монокристалічного сонячного елемента, описаний принцип дії, наведені основні співвідношення які описують енергетичного балансу фотоефекту, вольт-амперну характеристику ідеального та реального фотоелектричного перетворювача. Описаний вплив шунтуючого та послідовного опорів: чим більший послідовний опір, тим менше струм короткого замикання; чим менший шунтуючий опір, тим менша напруга холостого ходу. Показані співвідношення для основних параметрів сонячного елемента та їх вплив на ефективність роботи. Параметр, який характеризує ефективність перетворення світлової енергії в електричну – коефіцієнт корисної дії. Він залежить від струму та напруги, при яких вихідна потужність максимальна. Ці величини визначаються формою кривої ВАХ. Детально описані умови вимірювання та вимоги до спектру сонячних імітаторів. Було проаналізовано декілька типів ламп. Лампи, які не були розглянуті мають спектр, який малосхожий із спектром сонячного випромінювання. Описані методики проведення вимірювань імпульсним та постійним методом, де чітко зрозумілі переваги імпульсного методу.

РОЗДІЛ 2 Огляд сучасних тетсерів

2.1 Аналіз параметрів промислових тестерів.

Cell tester model # CT30AAA, Photo Emission Tech., Inc.



Рис. 2.1 Промисловий тестер фірми РЕТ.

Система вимірює ВАХ фотоелектричного перетворювача струмом до 20А. Вона вимірює параметри сонячного елемента, генерує звіти для друку та зберігає інформацію в текстовому файлі. Вимірювання в даному пристрої проводяться чотирьох точковим методом Кельвіна. Система включає в себе апаратну частину, програмну частину, модульний комп'ютер, систему контролю випромінювання та температури. Тестер вимірює та обраховує такі параметри[12]:

- Струм короткого замикання.
- Напруга холостого ходу.
- Максимальна потужність, максимальний струм та напруга.
- ККД та коефіцієнт наповненості ВАХ.
- Шунтуючий опір.
- Послідовний опір.
- Темновий струм.

- Температурний коефіцієнт струму короткого замикання.
- Температурний коефіцієнт напруги холостого ходу.
- Температурний коефіцієнт максимальної потужності.

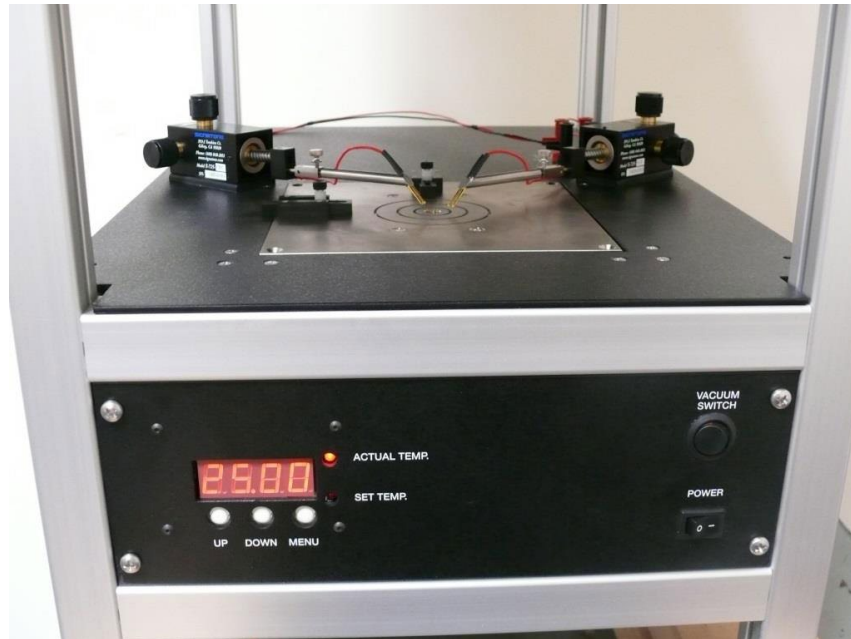


Рис.2.2 Вимірювальна поверхня тестера разом із контактами та терморегуляцією.

Основні відмінності тестера:

- Програмне обчислення елементів p та n типу без будь яких перепідключень.
- Покращена фільтрація шумів забезпечує вимірювання гарної якості.
- Обчислення опорів та ВАХ згідно із IEC 60891 та ASTM E948-09 Annex A1 стандартами.
- Можливість вимірювання температурних коефіцієнтів напруги холостого ходу, струму короткого замикання та потужності.
- Часові характеристики параметрів.
- 16-бітний тестер.
- Похибка вимірювання менше ніж 0.5%.
- Кількість точок на графіку 100-1000.
- Час вимірювання 0.5-4 с. в залежності від режиму.

- Діапазон температур вимірювання 5-60 °С.

c-Si Solar Cell Tester Model 58301, Chroma.

Як заявляє виробник, вимірювання вольт амперної характеристики потребує дотримання певних технічних умов, які сильно ускладнюють сам процес та отримання точних результатів, навіть за умови використання високоякісного сонячного імітатора. Виділено декілька основних умов[13]:

- Корекція спектрального розбігу.
- Одночасне вимірювання задля запобігання помилки викликаній тимчасовою нестабільністю інтенсивності випромінювання.
- Температурна корекція, нагрівання до 25°C або до заданої температури.



Рис. 2.3 Тестер фірми Chroma.

Відмінні властивості тестера:

- Корекція спектральної розбіжності.
- Можливість доповнення модулями для створення конвеєру.

- Терморегуляція.
- AAA+ клас сонячного імітатора.
- 16-бітний АЦП.

Solar cell I-V tester VS-6820, Industrial Vision Technology.

В даний тестер втілено новий досвід вимірювання та тестування сонячних елементів. Він забезпечує усі вимірювання та тестування, які необхідні згідно з міжнародними стандартами. Методи, процедура та обладнання відповідають міжнародному стандарту IEC 60904.

Вимірювання світлової ВАХ:

- Струм короткого замикання.
- Напруга холостого ходу.
- Максимальна потужність, максимальний струм та напруга.
- ККД та коефіцієнт наповненості ВАХ.

Вимірювання темної ВАХ:

- Шунтуючий опір.
- Обернений темновий струм.

Вимірювання ВАХ при трьох світлових інтенсивностях:

- Послідовний опір.

Вимірювання ВАХ при різній температурі:

- Температурний коефіцієнт струму короткого замикання.
- Температурний коефіцієнт напруги холостого ходу.
- Температурний коефіцієнт максимальної потужності.

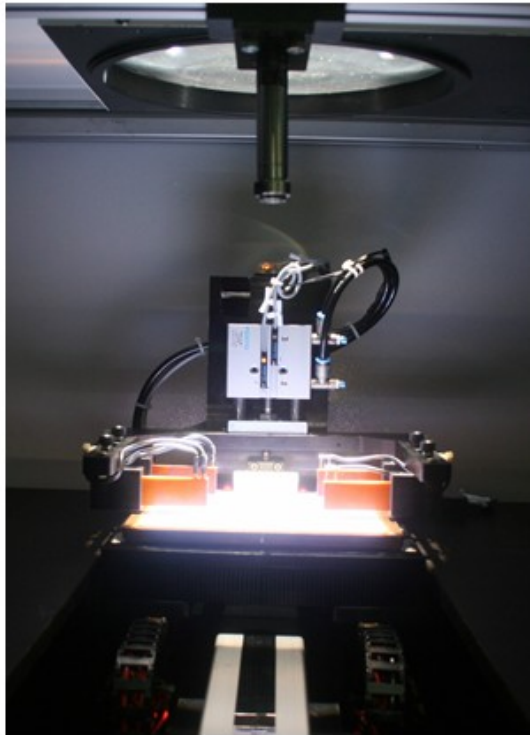


Рис. 2.4 Тестер фірми Industrial Vision Technology.

Photovoltaic IV test solution, Oriel Instruments.

Тестер даного виробника дозволяє виміряти всі стандартні параметри сонячного елемента. Особливістю даного тестера є адаптивність під різні типи сонячних елементів. Завдяки цьому його можна укомплектувати самими тими приладами та інструментами, які потрібні для вимірювання даного зразку сонячного фотоелектричного перетворювача. Даний набір не передбачає в своїй комплектації сонячного імітатора, він докупляється окремо та є сумісним із рештою обладнання фірми. Значним недоліком даного тестера є його ціна: ~13000€. На малюнку зображені модулі, які й являють собою готовий прилад,

серед яких гарно простежується тримач для зразку із функцією терморегуляції[14]-.



Рис. 2.5 Тестер фірми Oriel Instruments.

Solar Cell Tester, DENKEN.



Рис. 2.6 Тестер фірми DENKEN.

Даний вимірювач японського виробництва пропонує декілька режимів роботи (повна автоматизація для виробництва або одноразове вимірювання) та автоматичну калібровку випромінювання. Характеристики даного тестера можна розглянути на даній таблиці [15]:

Таблиця 4. Характеристики тестера фірми DENKEN.

Живлення	AC200-220V, 50/60Hz	
Цифро-аналоговий перетворювач	Діапазон напруг	-3V до +3V -16V до +7V
	Діапазон струму	-15A до +15A
	Родільна здатність	1/30000 діапазону
	Похибка	+/-0.1%
Аналогово-цифровий	Діапазон напруг	-1V до +1V -2V до +2V

перетворювач		-4V до +3V -8V до +3V -16V до +3V
	Родільна здатність	1/16000 діапазону
	Похибка	+/-0.1%
	Діапазон струму	15A,7.5A,3A,1.5A,150mA,75mA,30mA,15mA
	Родільна здатність	1/15000 діапазону
	Похибка	+/-0.1%
Вимірювання		Isc, Voc, Pm, Vpm, Ipm, FF, η, Rs та Rsh

Проаналізувавши інформацію вище можна виділити основні параметри, котрі повинен вимірювати тестер: струм короткого замикання I_{sc} , зворотній струм насичення I_0 , напруга холостого ходу V_{oc} , напруга максимальної потужності V_{pm} , струм максимальної потужності I_{pm} , коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики FF, коефіцієнт корсиної дії η , послідовний опір R_s та шунтуючий опір R_{sh} . Додатково більшість тестерів обладнують приладами для зміни температури вимірюваного зразка. Це дозволяє виміряти температурні коефіцієнти напруги холостого ходу, струму короткого замикання та потужності. Деякі виробники пропонують сонячні симулятори ААА+ класу, що означає практично точний спектр сонячного випромінювання. Це досягається шляхом комбінування різних джерел оптичного випромінювання та застосування різних фільтрів, що в результаті й дає спектр, майже такий, як у сонця.

Можна помітити, що тестери високого рівня обладнуються 16-бітними АЦП, що дозволяє більш точно проводити вимірювання тих чи інших параметрів. Для того, щоб прилад, який проектується, мав невеликі розміри та мав функціонал не гірше від того, що описаний в [1], вирішено використати більш дешевий мікроконтроллер PSoC 4, котрий коштує до 3 долларів або 78

гривень. Він не поступається функціями, котрі потрібні для забезпечення процедури вимірювання. Розміри та ціна вимірювача, з урахуванням усіх його складових, плануються набагато меншими, аніж це пропонують зарубіжні виробники. При цьому точність вимірювання незначно менша, аніж у промислових тестерів. Хоча ціна відрізнятиметься приблизно в декілька десятків та сотень разів. Для того щоб вимірювати температурні коефіцієнти у даній роботі буде передбачено конструкцію для терморегуляції вимірюваного зразка. Як найбільш схожий по спектру випромінювач світла вибрано ксенонову імпульсну лампу старого зразку.

Висновки:

В даному розділі був проведений детальний аналіз характеристик вимірювачі ВАХ та тестерів фотоелектричних перетворювачів. В ході огляду були прийняті деякі рішення з приводу конструкції вимірювача. Також аналіз показує, що майже усі тестери вимірюють набір основних параметрів. Це стає обов'язковою умовою для реалізації такого ж функціоналу в пристрої, що проектується. Розглянуті додаткові можливості та особливості представлених вимірювачів. Можна помітити, що є велика необхідність у виготовленні саме бюджетних вимірювачів вольт-амперних характеристик, котрі будуть компактними, дешевими та, в разі чого, можуть бути перелаштованими під інші умови вимірювання. Такий прилад буде найраціональнішим у використанні лабораторією.

РОЗДІЛ 3 Проектна частина

3.1 Обґрунтування вимірювальної схеми.

Зазвичай малі зразки сонячних панелей використовуються для дослідження та вдосконалення сонячних елементів. Вони характеризуються малими струмами та низькими температурними ємкостями, що визначає особливі вимоги до вимірювального обладнання.

Пропонується включити мінімальну кількість складових компонентів у вимірювальну схему. Це реалізується за допомогою використання програмованої системи на чіпі PSoC до якої підключене вимірювальне коло, вимірюваний зразок, еталонний зразок та терморегулятор. Також за рахунок PSoC відкривається можливість конфігурувати вимірювальну схему для зразків фотоперетворювачів іншої структури та матеріалів. Для точного визначення параметрів потрібно виміряти вольт-амперну характеристику в широкому діапазоні значень струмів та напруг, включаючи від'ємні значення.

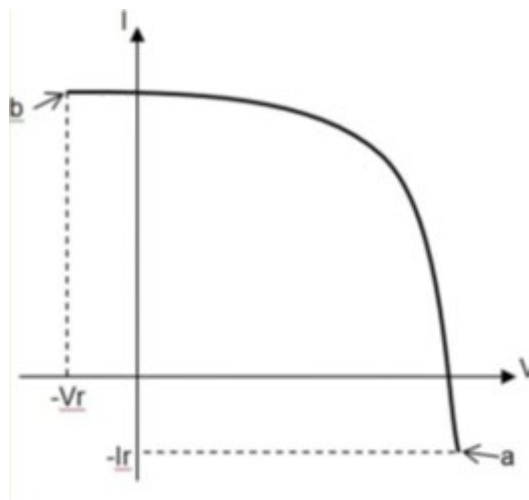


Рис. 3.1 Графік вимірювання вольт-амперної характеристики.

На рисунку: $-V_r$ - максимальна від'ємна напруга, $-I_r$ - максимальний від'ємний струм.

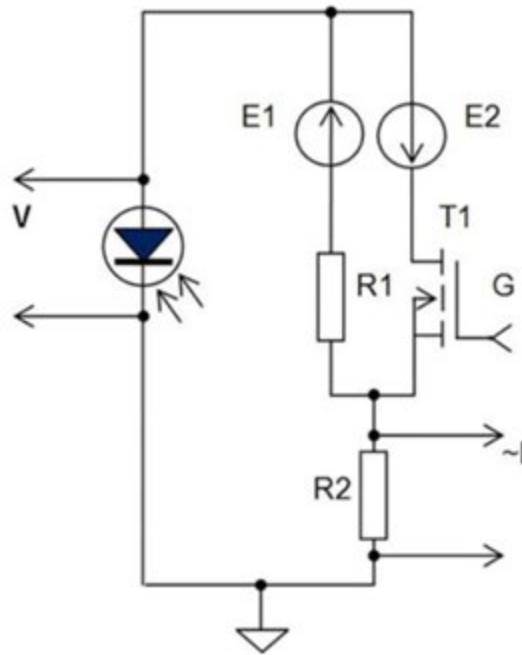


Рис. 3.2 Запропонована схема вимірювання.

Потужний польовий транзистор використовується для регулювання навантаження сонячного елемента та визначення вольт-амперної характеристики. Змінюючи опір каналу транзистору T1 від низьких до високих значень за рахунок зміни напруги на заслоні, вимірювання вольт-амперної характеристики відбувається від точки *a* до точки *b*.

Джерело напруги E2 включене в навантажувальний контур. Саме завдяки йому є можливість точного визначення струму короткого замикання та внутрішнього опору сонячного елемента. Також воно компенсує падіння напруги в каналі транзистора T1 та на опорі R2, який використовують для вимірювання струму. При таких умовах величина мінімального опору відкритого каналу не впливає на вимірювання. Максимальна негативна напруга на сонячному елементі V_r забезпечена напругою джерела напруги E2 без падіння напруги на відкритому каналі транзистора T1 та на резисторі R1 при струмі, наближеному до струму короткого замикання, коли транзистор T1 повністю відкритий (точка *b* на рис.1).

Джерело напруги E1 включене в навантажувальний контур для підтримки від'ємного струму через сонячний елемент. Максимально від'ємний струм

досягає значення $-I_r$, коли транзистор T1 повністю закритий (точка a на рис.1). Струм I_r забезпечений джерелом напруги $E1$, разом із резистором $R1$, враховуючи падіння напруги крізь зразок на резисторі $R2$ та внутрішній послідовний опір зразка R_s . Звідси маємо формулу:

$$I_r = \frac{E1 - U_{xx}}{R1 + R2 + R_s}$$

(10)

Якщо врахувати, що $R1 \gg (R2 + R_s)$, то отримаємо спрощене відношення:

$$I_r \approx E1/R1$$

(11)

Ця формула використовується для оцінки максимальних напруг та струмів в зразку, які можуть виникнути в процесі вимірювання системою.

3.2 Обробка сигналів.

Основою вимірювального приладу являється програмована система на чіпі PSoC4. В ній реалізований високий апаратний потенціал, який дозволяє обробляти аналогові та цифрові сигнали. За допомогою процесорного ядра 48МГц ARM Cortex-M0 та матриці цифрових та аналогових блоків таких, як АЦП, ЦАП та ін., відбувається вимірювання та обробка отриманих даних. Для того, щоб реалізувати заплановані функції, конфігурація системи повинна включати в собі аналогово-цифровий перетворювач для отримання та перетворення сигналів на еталонному та вимірюваному зразку, на діоді для визначення температури та на резисторі $R2$ для визначення струму.

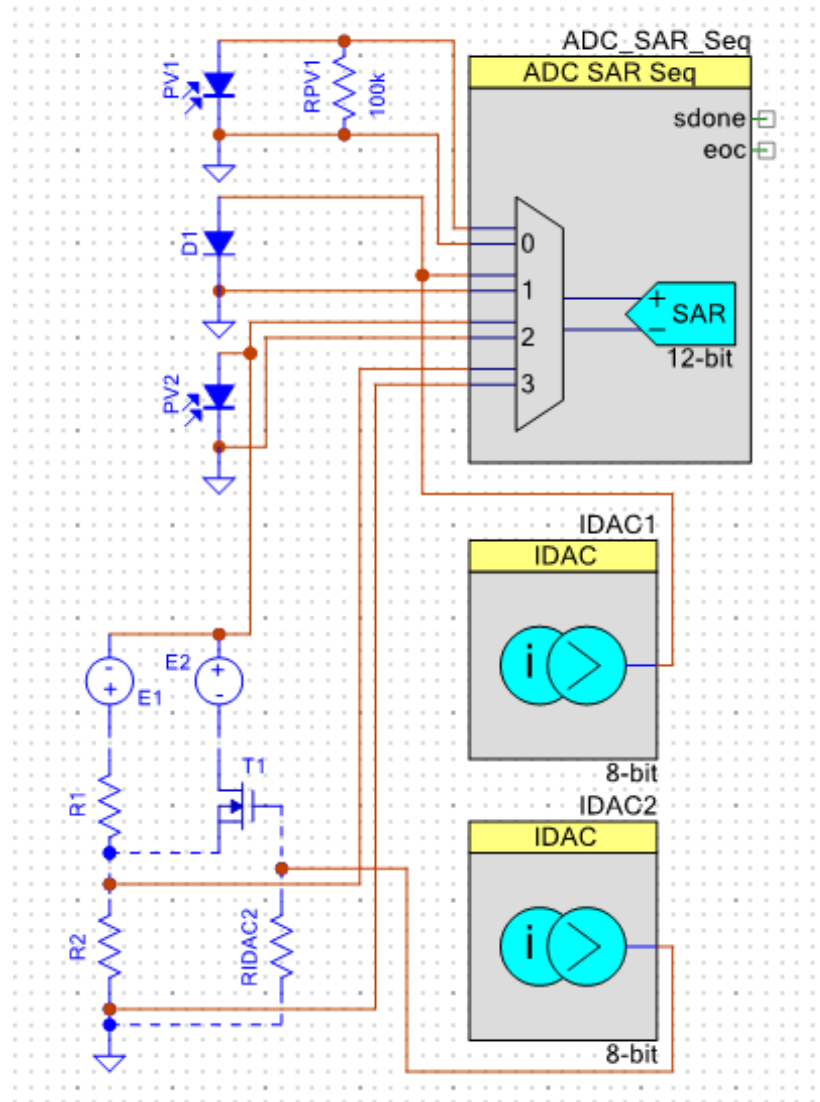


Рис. 3.3 Схема підключення основних складових вимірювального функціоналу до компонентів PSoC.

Струмний цифро-аналоговий перетворювач IDAC2 використовується для контролю напруги на заслоні транзистора T1 (як наслідок опір каналу та згодом навантаження вимірюваного зразку) через резистор RIDAC2. Роздільна здатність IDAC2 8 біт, що дозволяє точно деталізувати вольт-амперну характеристику.

У якості джерел напруги E1 та E2 використано лабораторні джерела напруги, які є в будь-якій лабораторії.

Температура вимірюється за рахунок подачі постійного струму на діод D1, електронно-дірковий перехід якого виступає в ролі сенсора температури, джерелом якого є IDAC1, та фіксації зміни напруги на ньому.

Випромінювання джерела світла вимірюється напругою на резисторі RPV1, який паралельно підключений до еталонного сонячного елемента PV1, працюючого в режимі короткого замикання, і є пропорційним струму короткого замикання.

Всі інформаційні сигнали (0 – напруга на резисторі RPV1, 1 – напруга на діоді D1, 2 – напруга на вимірюваному зразку PV2, 3 – напруга на резисторі R2) надходять до аналогово-цифрового перетворювача із чотирма диференційовними входами. Тактова частота АЦП – 8МГц. Це дозволяє провести вимірювання майже миттєво. Розрядність змінного навантаження на вимірюваному зразку становить 8 біт.

Номінали компонентів підбираються в залежності від бажаних діапазонів вимірювання та точності. Ціна мікроконтролера та компонентів вимірювального кола – 200 гривень.

3.3 Реалізація імітатора сонячного випромінювання.

Для того, щоб якомога краще відтворити сонячний спектр, враховуючи, що проєктований пристрій повинен бути дешевим, буде запропонована ксенонова імпульсна лампа. Сучасні ксенонові лампи, які виготовляють в основному для автомобільної індустрії, не задовольняють по спектру вимоги вимірювань, адже мають багато відфільтрованих частин спектру. Але відносно старі ксенонові лампи, які виготовлялись ще в СРСР, більше підходять для таких цілей. Далі пиводиться схема керування такою лампою [16]:

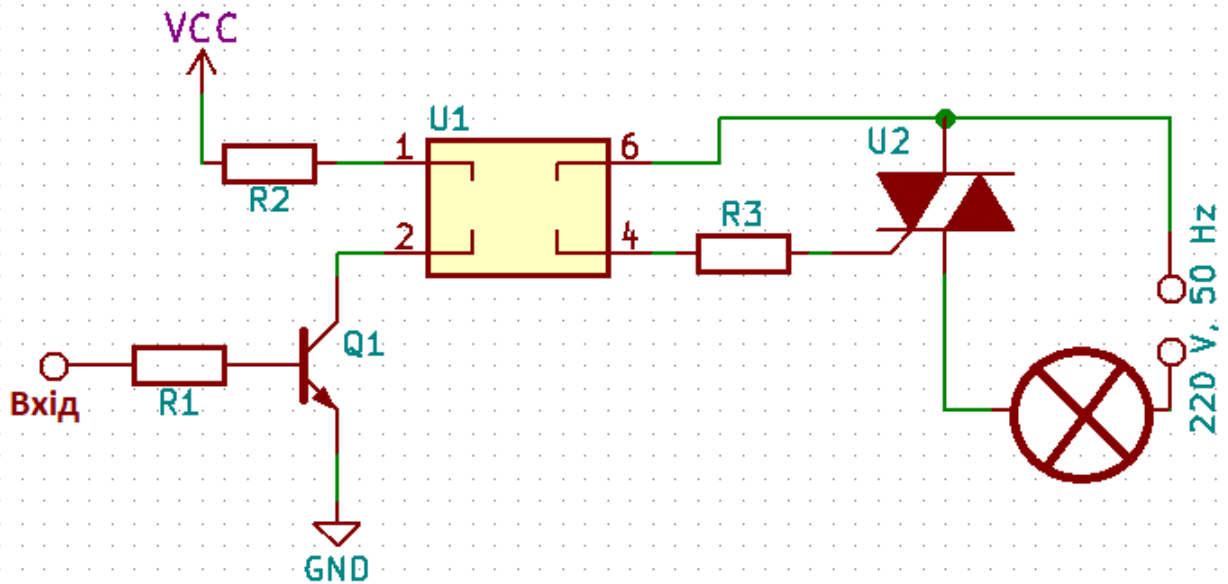


Рис. 3.4 Схема керування імпульсною ксеноною лампою за допомогою контролера.

Компоненти цієї схеми підбираються в залежності від параметрів мікроконтролера та вибраної оптики. Оптична U1 в даній схемі включена гальванічної розвязки електричних ланцюгів керування та живлення. Вона керує подачою живлення на лампу. А для керування цим живленням використовують сильний симісторний ключ відповідних параметрів U2. Резистор R3 підбирають в залежності від пікової напруги (приблизно $1.41 * 230V = 330V$) та відпираючого струму силового симістора, також він повинен бути доволі потужним. В свою чергу сама лампа повинна запускатись окремою схемою, адже потрібні кіловольти для яскравого спалаху та відповідний конденсатор для певної тривалості імпульсу. Таким вимогам відповідає схема запуску імпульсної ксеноною лампи. Вхід даної схеми підключається до цифро-аналогово перетворювача IDAC через резистор, який забезпечить подачу потрібної напруги на оптику. Далі приводиться запропонована схема:

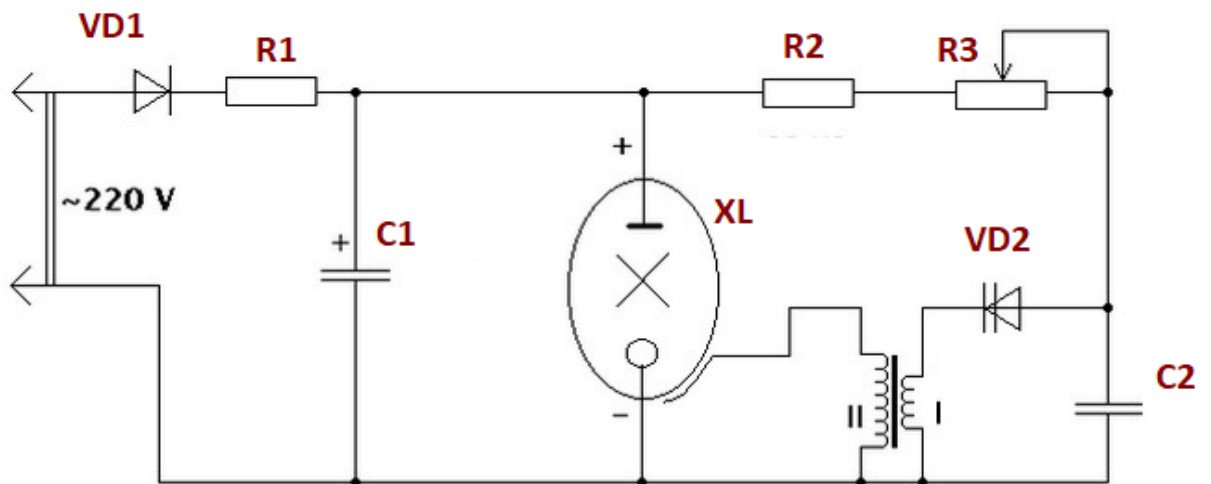


Рис. 3.5 Схема запуску імпульсної ксенонової лампи.

Дана схема живиться від розетки 220В змінного струму. Проте сама лампа потребує постійного струму. Діод VD1 зумовлює перетворення в постійний струм. Діод підбирається так, щоб прямий струм був не менше 3А. Після цього діоду в схемі знаходиться резистор R1, який обмежує струм. Потужність такого резистора повинна бути доволі великою, номінал близько сотні Ом, в залежності від потрібної яскравості спалаху. Далі у схемі стоїть конденсатор C1 ємністю 100 мікрофарад. Цей конденсатор також визначає інтенсивність спалаху світла. При збільшенні ємності збільшується інтенсивність спалаху, але лампа та резистор R1 починають нагріватись.

Для того щоб лампа спалахнула, на її основні електроди повинна подаватись напруга більше одного кіловольта, але в даній схемі немає такої напруги. Але, доприкладу в лампі ІФК-120 та в багатьох інших лампах тих часів, є третій пусковий електрод, для запуску лампи напруга на якому повинна бути 190В. По праву сторону від самої лампи знаходиться та частина схеми, яка й забезпечує пускові періодичні імпульси що запалюють лампу. Резистори R2 та R3 обмежують струм, що заряджає конденсатор C2. Змінюючи опір резистора R3, можна регулювати частоту спалахів лампи. До цього конденсатора приєднаний диністор VD2, котрий виконує роль ключа та пропускає через себе

заряд, накопичений на конденсаторі С2. Принцип функціонування його такий: при відповідній величині напруги на ньому він різко переходить із закритого у відкритий стан. Коли диністор відкривається, через нього на первинну котушку протікає заряд, який створює електромагнітне поле та індукує напругу великого значення на вторинній котушці трансформатора. Ця напруга запалює лапму.

Дана схема включається в коло керування живленням, яке показане на рисунку 3.4.

Приблизна ціна всіх компонентів – 300 гривень.

3.4 Будова терморегулятора.

Терморегулятор потрібен для вимірювання вольт-амперних характеристик при різних значеннях температури. Його основна функція – нагріти вимірюваний зразок сонячної батареї до певної величини температури. Склад такого пристрою матиме робочу поверхню та нагрівач. Але існують деякі складності у реалізації, які полягають в нерівномірному нагріві зразка та обробці мідної заготовки. Було вирішено застосувати в якості матеріалу робочої поверхні мідну пластину, адже показник теплопровідності цього металу має високий рівень, що буде сприяти рівномірному розповсюдженню теплової енергії в об'ємі робочої поверхні, а слідом й на його поверхні. У якості нагрівача було вирішено використати спіраль нагрівання, типу тих, які використовують в електроплитах. Щоб спіраль не замикала на мідну пластину, між ними потрібно встановити шар діелектрику. Для таких цілей підійде тонкий шар скла. На поверхню мідної пластини інтегрується сенсор температури, який був описаний вище.

Сам нагрівач буде увімкнений в розетку живлення 220В через реле, яке буде подавати живлення на нагрівач по команді керуючого струму мікроконтролера за допомогою IDAC. Таке реле є легкодоступним та коштує декілька десятків гривень. Ось приклад:

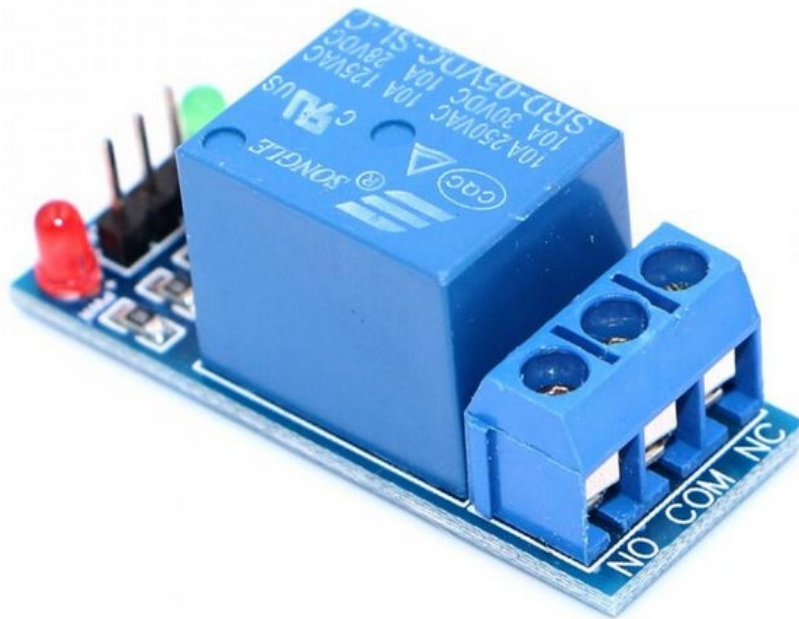


Рис. 3.6 Електро механічне реле.

Такий пристрій керується 5-ма вольтами та струмом 5-20мА. За таких параметрів його можна легко пристосувати до виводів мікроконтролера PSoC. При спрацюванні може пропускати через себе 10 ампер при змінній напрузі 250 вольт та 10 ампер постійної напруги 30 вольт. Ціна даного реле – 27 гривень. Ціна міді 350 грн/кг. Ціна нагрівача 100 грн. Разом – приблизно 300 грн.

3.5 Принцип функціонування тестера

Після подачі стартового сигналу на PsoC, він включає джерело випромінювання та починається моніторинг рівня освітленості. Після того, як рівень освітленості досягає значення $F_{\text{поч}}$, а це приблизно 95% від номінального значення, починається вимірювання значень струму, напруги та температури на вимірюваному зразку. При цьому значення навантаження змінюється, чим і забезпечується отримання ВАХ. Напруга на заслоні, який відкривається поступово, зменшує навантаження на сонячному елементі. Струм на навантаженні при цьому збільшується від мінімального до максимального значення. Після цього подається сигнал на терморегулюючий столик, котрий

збільшує температуру поверхні робочої області на 1°C , слідом змінюється температура вимірюваного зразка.

Одразу після встановлення необхідної температури починається вимірювання температурних коефіцієнтів та залежностей. Далі цикл повторюється доти, доки не буде досягнута максимальна температура. Вимірні значення параметрів зберігаються в RAM (Random Access Memory) системи. Після закінчення процедури PsoC вимикає нагрівач та передає дані з RAM на комп'ютер через кабель USB для подальшого обрахунку.

Нижче на рисунку викладена схема, яка спрощено ілюструє, яким чином відбувається вимірювання за допомогою програмованої системи на чіпі PsoC 4.

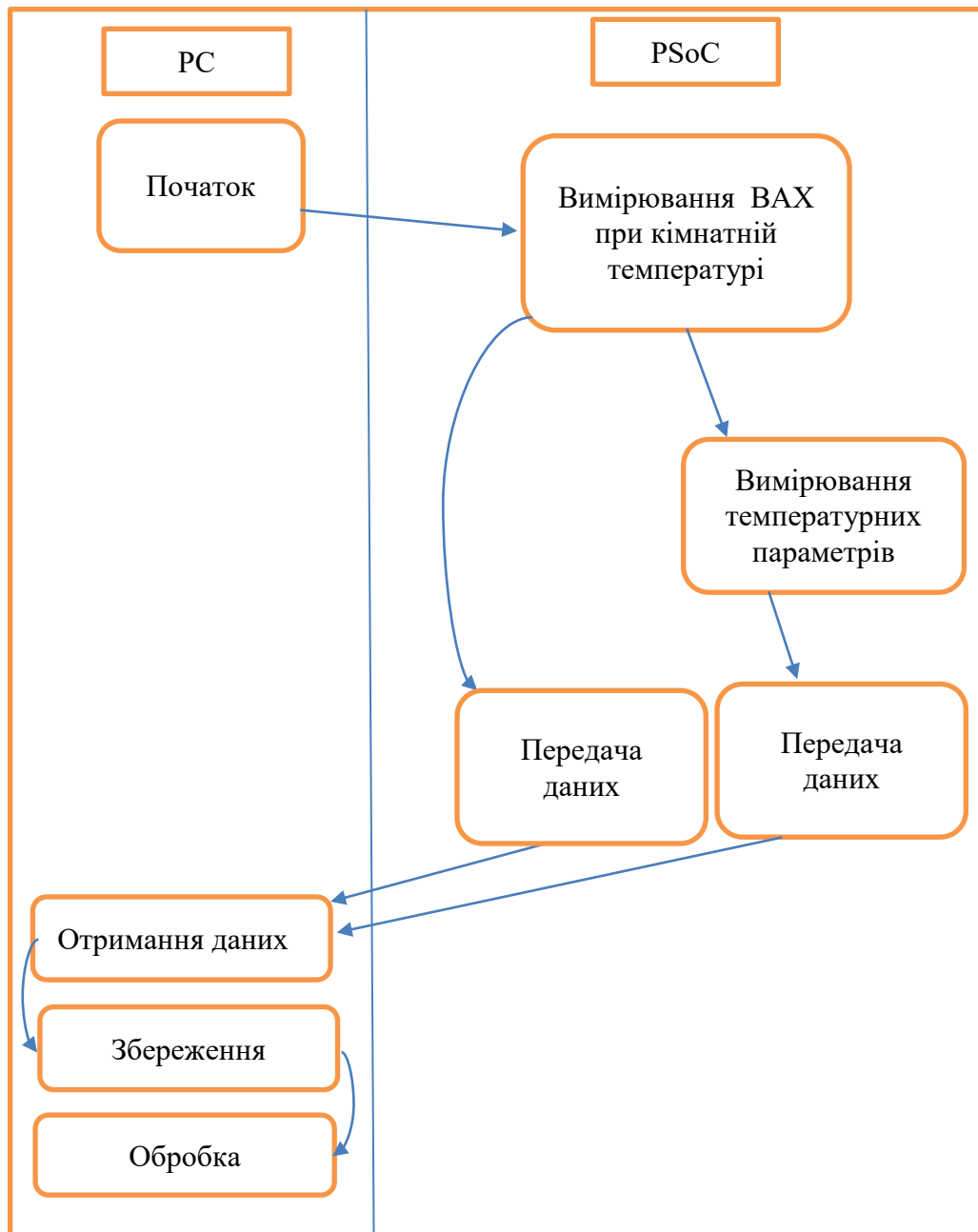


Рис. 3.7 Примітивна схема програми, яка керуватиме PsoC.

Розглянемо більш детально окремі блоки схеми, які зображені на рисунку 3.7. В свою чергу, другий блок, під назвою “Вимірювання ВАХ при кімнатній температурі” містить більш складну структуру та складається з множини певних дій, які скомпоновані аби забезпечити потрібний функціонал. Вимірювання ВАХ починається команди включення живлення та застосування конфігурацій компонентів. Далі відбувається подача цифро-аналоговим перетворювачем IDAC3 струму на оптопару щоб увімкнути лампу. Поки конденсатори в пусковій схемі лампи заряджаються, подається напруга на

цифро-аналоговий перетворювач IDAC1 для вимірювання температури. Слідуючим етапом буде зчитування температури та збереження її значення в окрему змінну. Потім вмикається канал аналогово-цифрового перетворювача, що відповідає за зчитування значень освітленості впродовж світлового імпульсу. Коли спалахує лампа, значення струму на сонячному елементі PV1 зростає, та коли воно досягає значення, пропорційному 95% освітлення, ЦАПом IDAC2 подається перше значення струму, котрих всього 255. Одночасно подається команда зчитування значень для відповідних каналів АЦП, котрі знімають струм та напругу на вимірюваному сонячному елементі. Після зчитування кожного такого значення, АЦП інформує про закінчення ковертації, струм на IDAC2 змінюється до слідуєчої величини, а виміряне АЦП значення напруги та струму зберігається у пам'ять. Після досягнення IDAC2 максимального значення, вмикається подача живлення на лампу, припиняється зчитування даних із всіх входів АЦП, окрім того, що відповідає за температуру, адже далі її значення будуть потрібні. Значення IDAC2 змінюється на початкове для проведення наступного вимірювання. Виміряні дані передаються через інтерфейс USB із пам'яті пристрою на компютер, де й буде продовжена їхня подальша обробка.

Блок схеми під назвою “Вимірювання температурних параметрів” також являє собою дещо складний процес. Для збільшення температури вимірюваного зразка, подається команда котра вмикає джерело струму IDAC4 та задає його значення, після чого вмикається реле й поверхня починає нагріватись. Температура контролюється та коли вона збільшиться на 1°C подається команда вимкнення подачі керуючого струму на реле, що вимкне нагрівач. Далі почнеться цикл вимірювання вольт амперної характеристики, який детально описаний вище. Після цього даний цикл повторюється до тих пір, поки не буде досягнута максимальна температура.

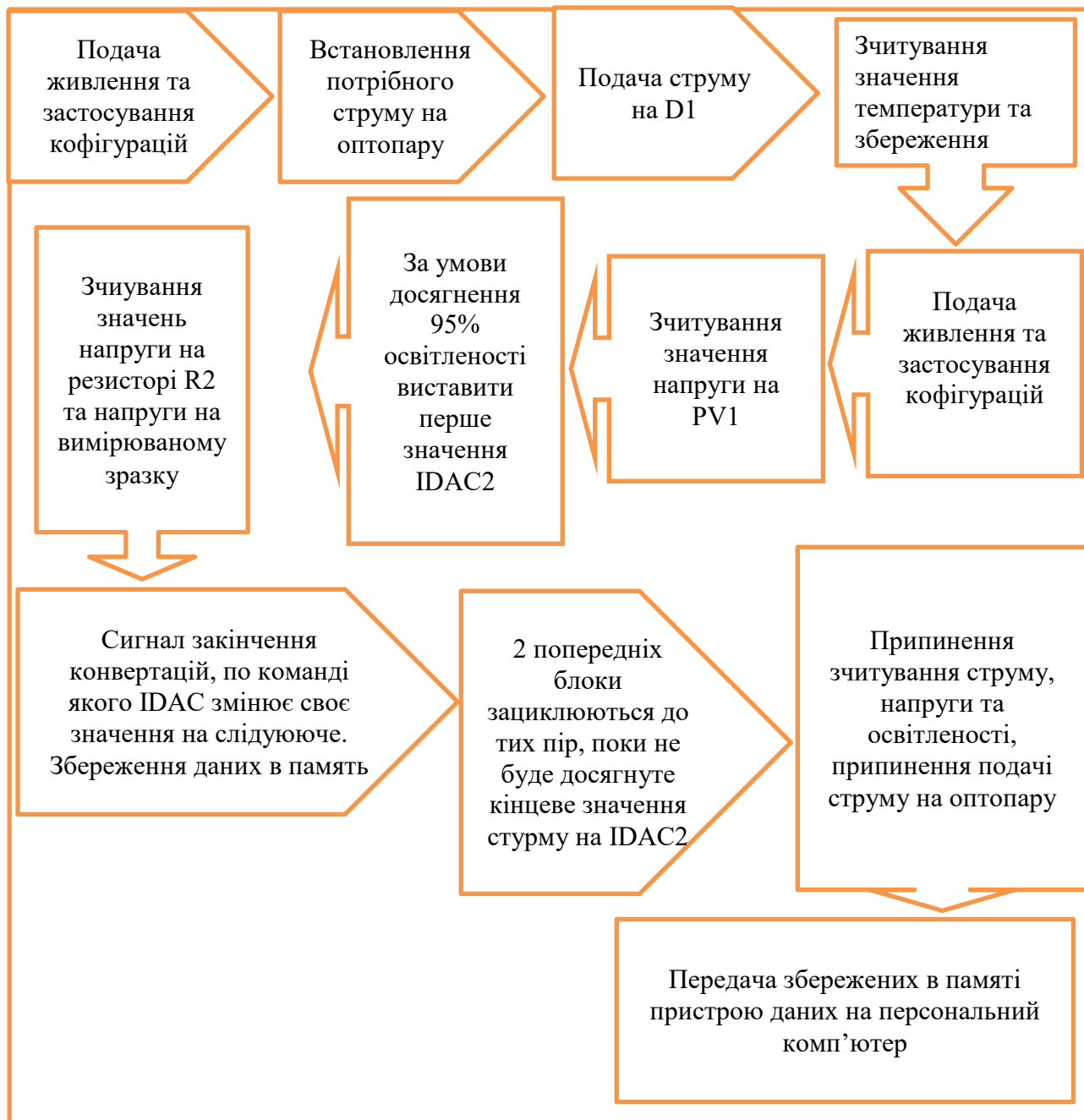


Рис. 3.8 Схема детального алгоритму вимірювання ВАХ при кімнатній температурі.

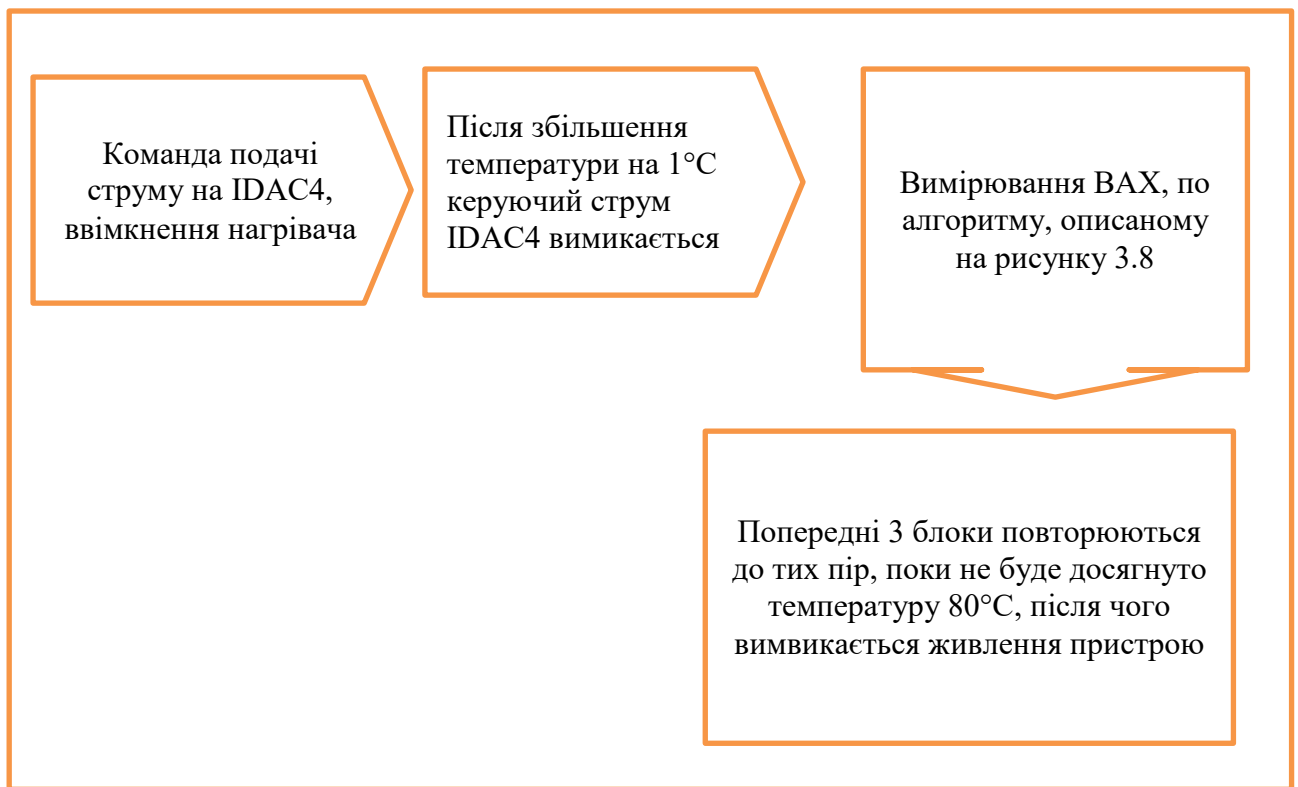


Рис 3.9 Схема детального алгоритму вимірювання температурних коефіцієнтів

Для того, щоб реалізувати ці та інші алгоритми на мікроконтролері потрібно встановити на комп'ютер програму із офіційного сайту виробника PSoC Creator. Вона в безкоштовному доступі та дозволяє створювати дизайн апаратної та програмної частини функціоналу, який повинен виконувати мікроконтролер. Слідуючим кроком має бути побудова схеми вимірювання з компонентами мікроконтролера та налаштування самих компонентів. Після налаштування потрібно правильно вивести сигнали на потрібні піни. Користуючись розділом “Допомога” даної програми та описом до кожного компоненту, який використовується в даній конфігурації приладу, потрібно, опираючись на описані вище алгоритми написати програмний код, скопіювати та зберегти його на пристрій. Програма, котра буде приймати дані від мікроконтролера буде містити в собі вирази для обрахунку параметрів сонячного елемента, які описані в першому розділі. Далі проводиться збірка вимірювача та його подальша калібровка.

Висновки:

В даному розділі була детально розглянута та обґрунтована вимірювальна схема та кожен компонент окремо. Показана методика вимірювання, за допомогою якої вимірюються параметри. Представлений дизайн системи вимірювання ВАХ на основі PSoC 4, схеми для керування та живлення імпульсною ксеноною лампою, запропонована будова терморегулюючого столика та принцип його керування. Ці дані в результаті відкривають можливість розробки обладнання для вимірювання ВАХ фотоелектричних перетворювачів. Описані алгоритми проведення процедури вимірювання ВАХ та температурних коефіцієнтів. Неважко підрахувати, що ціна пристрою складатиме близько 1000 гривень. Це в свою чергу є суттєвою економією в порівнянні із промисловими тесетрами, котрі коштують від 3 до 10 тисяч доларів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. V. F. Zavorotnyi, O. V. Borisov. The Laboratory Tester of Solar Cells with dynamic reconfiguration of measuring system.
2. Будько В.І. Сучасні технологічні процеси, обладнання та устаткування фотоелектричного перетворення сонячної енергії.
3. https://uk.wikipedia.org/wiki/Фотоелектрична_комірка#Загальний_опис
4. О. В. Борисов, Ю. І. Якименко. «Твердотільна електроніка».
5. О.Є. Максимова. Методичні вказівки щодо виконання самостійних робіт з дисципліни «Комп'ютерна електроніка».
6. https://studopedia.com.ua/1_27931_fotovoltaichniy-efekt-v-napivprovidnikah-z-elektronnoyu-neodnoridnistyu-strum-korotkogo-zamikannya-i-napruga-holostogo-hodu.html.
7. https://studopedia.com.ua/1_27932_vah-osvitlenogo-fotoelementa.html.
8. https://studopedia.com.ua/1_27933_vpliv-poslidovnogo-i-shuntuyuchogo-oporu-na-volt-ampernu-harakteristiku-sonyachnogo-elementa.html.
9. Божко К.М. Вдосконалення методів та засобів контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.13 / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».
10. IEC 60904-1-1:2017 Photovoltaic devices -Part 1-1: Measurement of current-voltage characteristics of multi-junction photovoltaic (PV) devices.
11. IEC 60904-9:2016 Photovoltaic devices -Part9: Solar simulator performance requirements.
12. http://www.photoemission.com/techspecs/CT30AAA_Cell_Tester_Rev._F_S_pecs.pdf.
13. http://www.chromaate.com/product/58301_c-Si_Solar_Cell_Tester.htm.
14. https://www.newport.com/medias/sys_master/software/software/h28/h4f/9132584435742/PVIV-Test-Solution-REV02-web.pdf
15. <https://www.dkn.co.jp/eng/se/TesterCell.html>

16. <https://velikodniy.github.io/2017/01/06/power-control/>