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

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

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

на тему Дослідження вольт-амперних характеристик фотоперетворювачів

Виконав: студент II курсу, групи 8,1713
спеціальності 171 «Електроніка»
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Електроніка
(код і назва освітньої програми)

Гогошидзе А.Ю.
(ініціали та прізвище)

Керівник зав.каф., д.т.н., проф. Притула Т.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент дир. ІПП ИВКФ Екотех Шершов С.А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2024

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Критська Т.В.
"1" 10 2024 року

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

Гончарук Анатолію Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Дослідження вольт-амперних характеристик фотоперетворювачів
керівник роботи Критська Т.В., д.т.н., професор,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "30" вересня 2024 року № 1483-с

2 Строк подання студентом роботи 05.12.2024р.

3 Вихідні дані до роботи: Розробити лабораторний стенд для дослідження ВАХ і динамічних характеристик ФЕП, вибрати відповідне ПЗ.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Розділ 1: Аналіз сучасного стану сонячних ФЕП на основі кремнію. Основні елементи, системи моніторингу. Розділ 2: Розробка стенду. Опис функціональної та електричної принципової схеми стенду.

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

1. Схеми імітації. 2. Схеми роботи сонячного елементу. 3. Схематичне зображення лаб. стенду. 4. Структурна схема стенду. 5. Електрична принципова схема стенду. 6. Схема проведення експерименту. 7. Фотографії лабораторного дослідження. 8. Результати дослідження.

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Христенко Т.В., зав.каф		
2	Христенко Т.В., зав.каф		
3	Христенко Т.В., зав.каф		
4	Христенко Т.В., зав.каф		
5	Христенко Т.В., зав.каф		

7 Дата видачі завдання 01.10.2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз світового стану проблеми.	08.10.24	вик
2.	Принцип роботи, конструкція ФЕП	15.10.24	вик
3.	Розробка лабораторного стенду	14.11.24	вик
4.	Дослідження ВАХ ФЕП	20.11.24	вик
5.	Розробка, опис моделі, результати моделювання.	01.12.24	вик
6.	Розрахунок заземлення	03.12.24	вик
7.	Оформлення графічної частини	05.12.24	вик

Студент _____ Гагошидзе А.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ Христенко Т.В
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

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

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить 107 стор., 44 рис., 8 табл., 24 джерел літератури.

МУЛЬТІКРИСТАЛІЧНИЙ КРЕМНІЙ, РІВЕНЬ ОСВІТЛЕНОСТІ, СПЕКТРАЛЬНИЙ СКЛАД, СВІТЛОВИЙ ПОТІК, ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ВОЛЬТ-АМПЕРНІ ТА ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, МОДЕЛЮВАННЯ, ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ

Мета випускної роботи освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр» – дослідження вольт-амперних і динамічних характеристик фотоелектричного перетворювача в залежності від рівня освітленості і спектрального складу світлового потоку

Об’єкт дослідження – фотоперетворювачі на основі мультікристалічного кремнію

Предмет дослідження – вольт-амперні та динамічні характеристики фотоелектричного перетворювача.

Для проведення експериментальних досліджень вольт-амперних характеристик фотоперетворювачів розроблений лабораторний стенд.

ЗМІСТ

ВСТУП……... 6
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ КРЕМНІЮ... 8
1.1 Загальні відомості……. 8
1.2 Основні принципи роботи……... 10
1.3 Конструкції і матеріали фотоелектричних перетворювачів на основі кремнію…….. 13
1.4 Каскадні сонячні елементи…….. 24
1.5 Сонячні елементи для космонавтики……. 26
1.6 Майбутнє фотовольтаїки……. 28
1.7 Основні елементи фотовольтаїчної систем……... 30
1.8 Схемо-технічні рішення ……. 31
1.9 Акумуляторні батареї…….. 34
1.10 Контролер сонячного заряду……. 38
1.11 Інвертор……... 40
1.12 Робота при паралельному та послідовному з’єднанні сонячних панелей…….. 42
1.13 Перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну з допомогою напівпровідникових елементів……... 45
1.13.1 Ідеальний фотоелемент…… 46
1.13.2 Вольт-амперні характеристики……. 54
1.14 Постановка завдання…….. 58
2 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТО-ПЕРЕТВОРЮВАЧА……. 59
2.1 Аналіз проблеми та постановка задачі моделювання……. 62
2.2 Опис моделі……. 63
2.3 Результати моделювання……... 64
3 РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА…….. 67

3.1 Опис функціональної схеми 67
3.2 Опис електричної принципової схеми 69
3.3 Розрахунок функціональних вузлів стенду 73
3.3.1 Розрахунок елементів тактового генератора ТГ1 74
3.3.2 Розрахунок елементів індикації 78
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВАХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА 80
4.1 Охорона праці при виготовленні лабораторного стенда та проведення досліджень 82
4.2 Розрахунок заземлення будівлі 85
4.3 Пожежна та техногенна безпека 89
5 ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОВЕДЕННЯ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ 92
5.1 Етапи проведення наукового дослідження 92
5.2 Сітьове планування 97
ВИСНОВКИ 99
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 100
Додаток А 103
Додаток Б 105

ВСТУП

Через суттєвий вплив на довкілля під час використання традиційних енергоносіїв та постійне зростання їх вартості останнім часом значна увага приділяється альтернативній і поновлюваній енергетиці. На сьогоднішній день серед альтернативних джерел енергії (тепла Землі, енергії вітру, припливів та відпливів, біогазу тощо) провідне місце займає використання сонячної енергії. Це пов‘язано з головними перевагами цього виду енергії: загальна доступність, екологічність, практична невичерпність, можливість безпосереднього перетворення сонячної енергії у видимому та ближньому інфрачервоному спектрі випромінення у теплову або електричну енергію.

На сьогоднішній день у сонячну енергетику в усьому світі інвестовано понад 150 млрд доларів США, щорічно цей обсяг збільшується на 15 - 20%. При збереженні нинішніх темпів зростання фотоенергетики, до 2020 р. близько 10% електроенергії в світі може вироблятися за рахунок фотоелектричних систем, а до 2050 р. фотоенергетика стане найбільшим ресурсом забезпечення світових потреб в електроенергії. У ряді регіонів світу вартість сонячної електроенергії за останні два роки вже зрівнялася з вартістю традиційної.

Однак потенціал альтернативної енергетики в Україні дуже слабо використовується. Однією з причин такого стану розвитку альтернативної енергетики є нерозвиненість вітчизняного ринку виробництва необхідного обладнання. Крім того, при практичному створенні автономних енергетичних систем необхідно враховувати ряд особливостей використання альтернативних джерел. Так, у разі створення автономних електроустановок, в яких джерелами енергії є фотоелектричні перетворювачі необхідно враховувати те, що вироблення енергії цими первинними джерелами, як правило, суттєво не збігається з графіками споживання енергії споживачем. У цій ситуації ключовими компонентами автономної системи є система акумулювання, перетворення і вторинної генерації енергії.

Для збільшення енергії, що відбирається від сонячних батарей, підвищення енергоефективності процесів акумулювання електроенергії, вторинної генерації енергії з заданими параметрами необхідно застосовувати системи на основі сучасних пристроїв перетворювальної техніки і створювати швидкодіючі системи управління, адаптовані на вказане коло завдань.

Найбільш ефективними, з енергетичної точки зору, пристроями для перетворення сонячної енергії в електричну є напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі (ФЕП), оскільки це прямий, одноступінчатий перехід енергії. Коефіцієнт корисної дії (ККД) вироблених в промислових масштабах фотоелементів в середньому становить 16%, у кращих зразків досягає 25%.

Аналізу сучасного стану вказаних проблем та розробці методів їх вирішенню і присвячена робота.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ КРЕМНІЮ

1.1 Загальні відомості

Джерелом енергії сонячного випромінювання служить термоядерна реакція - кожну секунду на Сонці приблизно $6 \cdot 10^{11}$ кг водню перетворюється в гелій. Дефект маси при цьому становить 4000 кг, що відповідно до співвідношення Ейнштейна $E = mc^2$ призводить до виділення $4 \cdot 10^{20}$ Дж енергії. Основна частина цієї енергії випускається у вигляді електромагнітного випромінювання в діапазоні 0,2-3 мкм.

Оскільки повна маса Сонця становить приблизно $2 \cdot 10^{30}$ кг, воно повинно перебувати в досить стабільному стані понад 10 млрд. років з постійним виділенням енергії.

Інтенсивність сонячного випромінювання у вільному просторі на відстані, рівному середній відстані між Землею і Сонцем, називається сонячною постійною. Її величина - 1353 Вт/м^2. При проходженні через атмосферу сонячне світло послаблюється в основному через поглинання інфрачервоного випромінювання парами води, ультрафіолетового випромінювання - озоном і розсіюванням випромінюючих частинок атмосферного пилу та аерозолями.

Показник атмосферного впливу на інтенсивність сонячного випромінювання, що доходить до земної поверхні, називається «повітряною масою» (АМ). АМ визначається як секанс кута між Сонцем і зенітом. На рис.1.1 показано спектральний розподіл інтенсивності сонячного випромінювання в різних умовах.

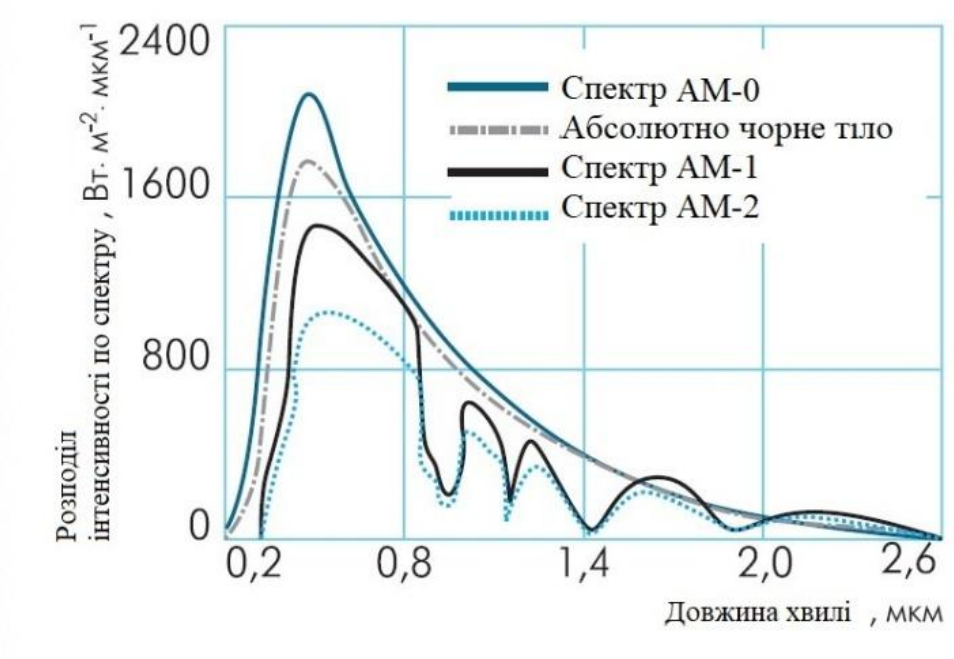


Рисунок 1.1 – Розподіл інтенсивності по спектру сонячного випромінювання

Верхня крива (АМ-0) відповідає сонячному спектру за межами земної атмосфери (наприклад, на борту космічного корабля), тобто при нульовій повітряній масі. Вона апроксимується розподілом інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі 5800 К. Криві АМ-1 і АМ-2 ілюструють спектральний розподіл сонячного випромінювання на поверхні Землі, коли Сонце в зеніті і при куті між Сонцем і зенітом 60°, відповідно. При цьому повна потужність випромінювання - відповідно близько 925 і 691 Вт/м^2. Середня інтенсивність випромінювання на Землі приблизно збігається з інтенсивністю випромінювання при АМ = 1,5 (Сонце - під кутом 45° до горизонту) [1].

Таким чином, при використанні високоефективних методів перетворення енергії Сонце може забезпечувати бурхливо зростаючі потреби в ній практично вічно.

1.2 Основні принципи роботи

Найпростіша конструкція сонячного елемента (СЕ) - приладу для перетворення енергії сонячного випромінювання - на основі монокристалічного кремнію показана на рис.1.2.

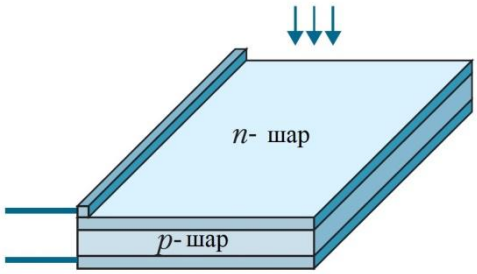
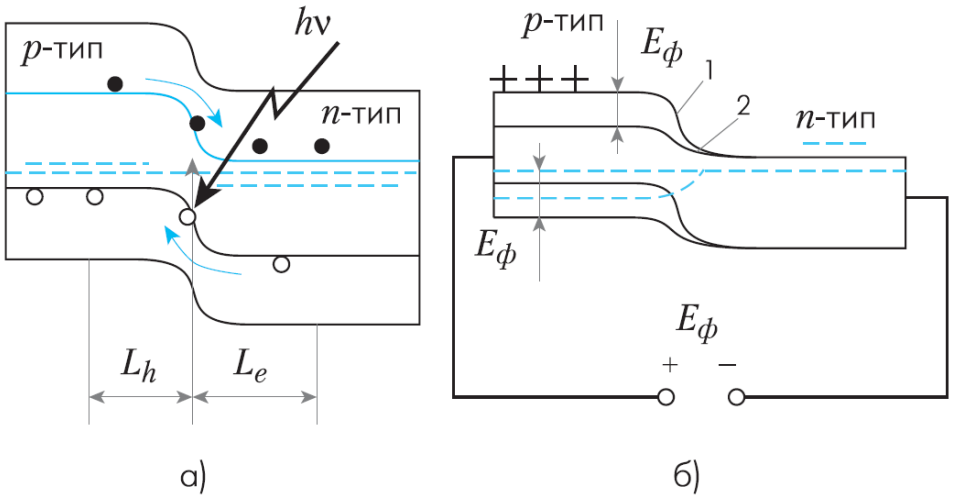


Рисунок 1.2 – Конструкція сонячного елемента

На малій глибині від поверхні кремнієвої пластини p-типу сформований p-n-перехід з тонким металевим контактом. На тильну сторону пластини нанесено суцільний металевий контакт.

Коли СЕ висвітлюється, поглинені фотони генерують нерівноважні електрон-діркові пари. Електрони, які генеруються в p-шарі поблизу p-n-переходу, підходять до p-n-переходу і існуючим в ньому електричним полем переносяться в n-область. Аналогічно і надлишкові дірки, створені в n-шарі, частково переносяться в p-шар (рис.1.3 а). В результаті n-шар набуває додатковий негативний заряд, а p-шар - позитивний. Знижується первісна контактна різниця потенціалів між p- і n-шарами напівпровідника, і у зовнішньому ланцюгу з'являється напруга (рис.1.3 б). Негативному полюсу джерела струму відповідає n-шар, а p-шар - позитивному.



а) в початковий момент освітлення; б) зміна зонної моделі під дією постійного освітлення і виникнення фото електрорушійної сили (ЕРС)

Рисунок 1.3 – Зонна модель розімкнутому p-n-переходу:

Величина сталої фото ЕРС при висвітленні переходу випромінюванням постійної інтенсивності описується рівнянням вольт-амперної характеристики (ВАХ) (рис.1.4):

$$U = \frac{kT}{q} ln \frac{I_{ph} - I}{I_s} + 1 \qquad (1.1)$$

де I_s - ток насичення, а I_{ph} - фотострум.

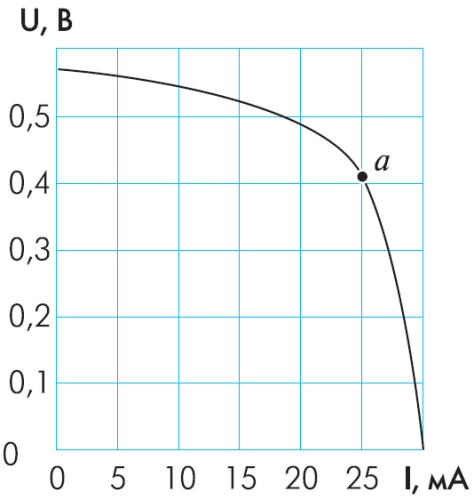


Рисунок 1.4 – Вольт-амперна характеристика сонячного елементу

ВАХ пояснює еквівалентна схема фотоелемента (рис.1.5), що включає джерело струму $I_{ph} = S_q N_0 Q$, де S- площа фотоелемента, а коефіцієнт збирання Q - безрозмірний множник (<1), що показує, яка частка всіх створених світлом електронно-діркових пар (SN_0) збирається p-n-переходом. Паралельно джерелу струму включений p-n-перехід, струм через який дорівнює I_s [$e^{qU / kT}$ - 1]. p-n-перехід шунтує навантаження, і при збільшенні напруги струм через нього швидко зростає. У навантаження (опір R) відбирається струм I.

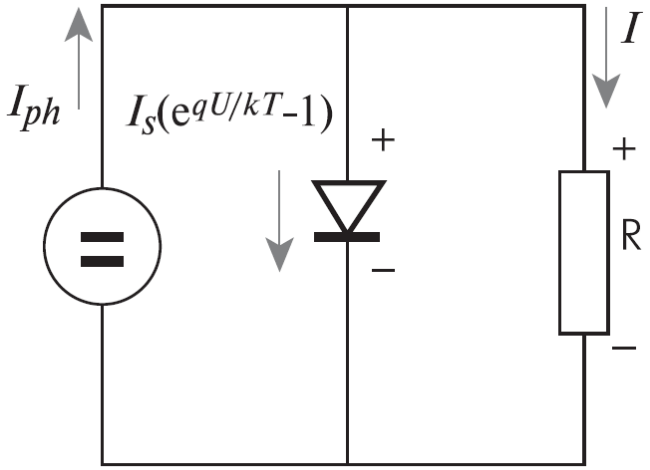


Рисунок 1.5 – Еквівалентна схема сонячного елемента

Рівняння ВАХ справедливо і при освітленні фотоелемента світлом довільного спектрального складу, змінюється лише значення фотоструму I_{ph}. Максимальна потужність відбирається в тому випадку, коли фотоелемент знаходиться в режимі, зазначеному точкою а (див. рис.1.4).

Максимальна потужність, що знімається з 1 см^2, дорівнює:

$$P = I_{ph} \quad U = x \cdot I_{кэ} \cdot U_{xx} \tag{1.2}$$

де x - коефіцієнт форми або коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики, $I_{кз}$ - струм короткого замикання, U_{xx} - напруга холостого ходу.

1.3 Конструкції і матеріали фотоелектричних перетворювачів на основі кремнію

Для ефективної роботи сонячних елементів необхідне дотримання ряду умов:

- оптичний коефіцієнт поглинання активного шару напівпровідника повинен бути достатньо великим, щоб забезпечити поглинання значної частини енергії сонячного світла в межах товщини шару;

- генеруючись при висвітленні електрони і дірки мають ефективно збиратися на контактних електродах з обох сторін активного шару;

- сонячний елемент повинен володіти значною висотою бар'єру в напівпровідниковому переході;

- повний опір, включений послідовно з сонячним елементом (виключаючи опір навантаження), має бути малим для того, щоб зменшити втрати потужності в процесі роботи;

- структура тонкої плівки повинна бути однорідною по всій активній області сонячного елемента, щоб виключити закорочування і вплив шунтуючих опорів на характеристики елемента.

Виробництво структур на основі монокристалічного кремнію, що задовольняють цим вимогам, - процес технологічно складний і дорогий. Тому увага була звернена на такі матеріали, як сплави на основі аморфного кремнію (a-Si:H), арсенід галію і полікристалічні напівпровідники [2].

Аморфний кремній виступив в якості більш дешевої альтернативи монокристалічному [3]. Перші СЕ на його основі було створено в 1975 році. Оптичне поглинання аморфного кремнію в 20 разів вище, ніж кристалічного. Тому для істотного поглинання видимого світла досить плівки a-Si:H товщиною 0,5-1,0 мкм замість дорогих кремнієвих 300-мкм підкладок. Крім того, завдяки існуючим технологіям отримання тонких плівок аморфного кремнію великої площі не потрібні операції різання, шліфування й полірування, необхідних для СЕ на основі монокристалічного кремнію. У

порівнянні з полікристалічними кремнієвими елементами вироби на основі a-Si:H виробляють при більш низьких температурах (300 С), що дозволяє використовувати дешеві скляні підкладки, що скоротить витрату кремнію в 20 разів.

Поки максимальний коефіцієнт корисної дії (ККД) експериментальних елементів на основі a-Si:H - 12% - трохи нижче ККД кристалічних кремнієвих СЕ (приблизно 15%). Однак не виключено, що з розвитком технології ККД елементів на основі a-Si:H досягне теоретичного максимуму - 16%.

Найбільш прості конструкції СЕ з a-Si:H були створені на основі структури метал - напівпровідник (діод Шотки) (рис.1.6).

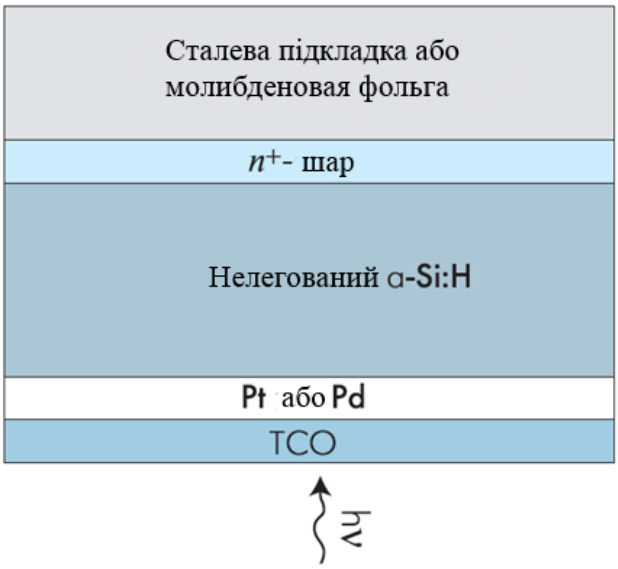


Рисунок 1.6 – Конструкція фотоелемента з бар'єром Шотки

Незважаючи на видиму простоту, їх реалізація досить проблематична - металевий електрод повинен бути прозорим і рівномірним по товщині, а їхні стан на кордоні метал/a-Si:H - стабільними в часі. Найчастіше сонячні елементи на основі a-Si:H формують на стрічці з нержавіючої сталі або на скляних підкладках, покритих провідним шаром.

При використанні скляних підкладок на них наносять прозору для світла провідну оксидну плівку (ТСО) з SnO_2, In_2O_3 або $SnO_2 + In_2O_3$ (ІТО), що дозволяє висвітлювати елемент через скло. Оскільки у нелегованого шару електронна провідність виражена слабо, бар'єр Шотки створюється за рахунок осадження металевих плівок з високою роботою виходу (платина (Pt), родій (Rh), паладій (Pd)), яка зумовлює утворення області позитивного об'ємного заряду (збідненого шару) в a-Si:H.

При нанесенні аморфного кремнію на металеву підкладку утворюється небажаний потенційний бар'єр a-Si:H/металева підкладка, висоту якого необхідно зменшувати. Для цього використовують підкладки з металів з малою роботою виходу (молібден (Mo), нікель (Ni), ніобій (Nb)). Перед нанесенням аморфного кремнію бажано осадити на металевій підкладці тонкий шар (10-30 нм) a-Si:H легований фосфором. Не рекомендується використовувати в якості матеріалів електродів легко дифундуючі в аморфний кремній метали (наприклад, золото (Au) і алюміній (Al)), а також мідь (Cu) та срібло (Ag), оскільки a-Si:H має погану адгезію до них. Відзначимо, що U_{xx} сонячних елементів з бар'єром Шотки на основі a-Si:H зазвичай не перевищує 0,6 В. Більш високою ефективністю володіють СЕ на основі аморфного кремнію з p-i-n - структурою (рис.1.7).

У цьому «заслуга» широкої нелегованої і-області a-Si:H, що поглинає істотну частку світла. Але виникає проблема - дифузійна довжина дірок в a-Si:H дуже мала (приблизно 100 нм), тому в сонячних елементах на основі a-Si:H носії заряду досягають електродів в основному тільки завдяки внутрішньому електричному полю, тобто за рахунок дрейфу носіїв заряду. У СЕ на основі кристалічних напівпровідників носії заряду, маючи велику дифузійну довжину (100 - 200 мкм), досягають електродів і під час відсутності електричного поля. Оскільки в простому p-n переході в a-Si:H область сильного електричного поля дуже вузька і дифузійна довжина носіїв заряду мала, в більшій частині СЕ не відбувається ефективного поділу носіїв заряду, що генеруються при поглинанні світла. Отже, для отримання

ефективних СЕ на основі p-i-n структур аморфного гідрогенизированого кремнію необхідно домогтися у всій i- області однорідного потужного внутрішнього електричного поля, достатнього для досягнення довжини дрейфу носіїв, порівнянного з розмірами області поглинання (див. рис.1.7).

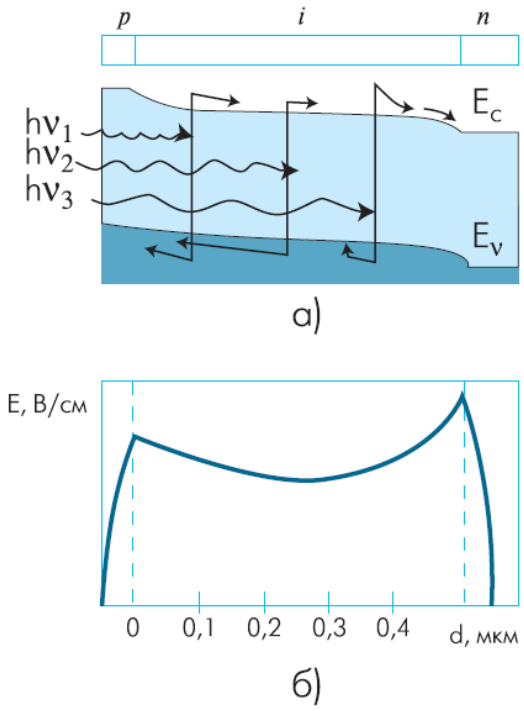


Рисунок 1.7 – Енергетична зонна діаграма p-i-n-структури (а) і розрахунковий розподіл електричного поля (б).

Дане завдання вирішується, якщо при виготовленні p-i-n-структури першим формувати p-шар (рис.1.8).

Для його створення необхідно невелика кількість бору (<10^{18} $см^3$), а значить істотного забруднення нелегованого шару не відбувається. У той же час, якщо першим осаджувати n-шар, то наявність залишкового фосфору змінює властивості i-шару. Формування p-шару на поверхні прозорого провідного електрода забезпечує з ним хороший електричний контакт. Однак товщина p-шару повинна бути мала (10 нм), щоб основна частина світла поглиналася в i-області.

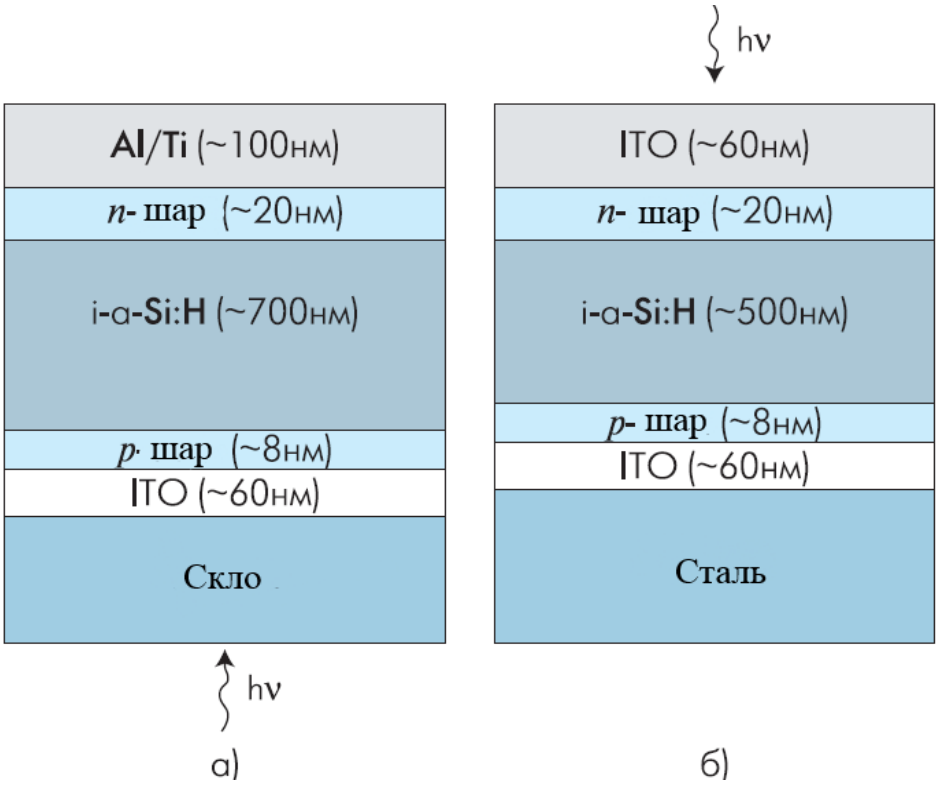


Рисунок 1.8 – p-i-n структура на скляній (а) і сталевій (б) підкладці

Використовується й інша p-i-n-структура СЕ на основі a-Si:H з підкладкою з металевої фольги, зокрема з нержавіючої сталі. Світло потрапляє з боку прозорого електрода, що контактує з n-областю. В результаті зростає щільність струму короткого замикання завдяки відбиваючої здатності металевої підкладки і меншому оптичному поглинанню світла легованими фосфором плівками a-Si:H (n-область) в порівнянні з легованими бором p-шарами.

Проблема із застосуванням розглянутих p-i-n-елементів в тому, що їх можливо оптимізувати тільки в одному вимірі. Значно більше можливостей в цьому плані надає СЕ з поперечним переходом [4]: на ізолюючій підкладці перпендикулярно до поверхні формується p-i-n-структура a-Si:H (рис.1.9).

Такий СЕ не вимагає прозорого провідного оксиду в якості контакту і широкозонного p-шару для створення прозорого віконного шару, його можна виготовити за допомогою стандартних технологій мікроелектроніки.

Арсенід галію один з найбільш перспективних матеріалів для створення високоефективних сонячних батарей - арсенід галію. Це пояснюється таким його особливостями, як:

- майже ідеальна для одно перехідних сонячних елементів ширина забороненої зони 1,43 еВ;

- підвищена здатність до поглинання сонячного випромінювання: потрібний шар товщиною всього в декілька мікрон;

- висока стійкість до радіації, що спільно з високою ефективністю робить цей матеріал надзвичайно привабливим для використання в космічних апаратах;

- відносна нечутливість до нагрівання батарей на основі GaAs;

- характеристики сплавів GaAs з алюмінієм, миш'яком, фосфором або індієм доповнюють характеристики GaAs, що розширює можливості при проектуванні СЕ.

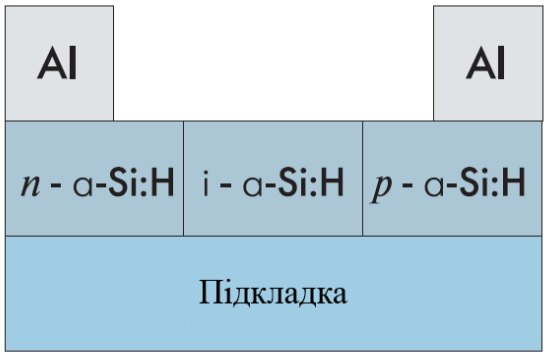


Рисунок 1.9 – Сонячна батарея з поперечним переходом

Головна перевага арсеніду галію і сплавів на його основі - широкий діапазон можливостей для дизайну СЕ. Фотоелемент на основі GaAs може складатися з декількох шарів різного складу. Це дозволяє розробнику з великою точністю керувати генерацією носіїв заряду, що в кремнієвих СЕ обмежено допустимим рівнем легування. Типовий СЕ на основі GaAs складається з дуже тонкого шару AlGaAs в якості вікна.

Основний недолік арсеніду галію - висока вартість. Для здешевлення виробництва пропонується формувати СЕ на більш дешевих підкладках; вирощувати шари GaAs на підкладках багаторазового використання.

Полікристалічні тонкі плівки також вельми перспективні для сонячної енергетики.

Надзвичайно висока здатність до поглинання сонячного випромінювання у діселеніда міді та індію ($CuInSe_2$) - 99% світла поглинається в першому мікроні цього матеріалу (ширина забороненої зони - 1,0 еВ) [5]. Найбільш поширеним матеріалом для виготовлення вікна сонячної батареї на основі $CuInSe_2$ є CdS. Іноді для поліпшення прозорості вікна в сульфід кадмію додають цинк. Трохи галію в шарі $CuInSe_2$ збільшує ширину забороненої зони, що призводить до зростання напруги холостого ходу і, отже, підвищення ефективності пристрою. Один з основних способів отримання $CuInSe_2$- електрохімічне осадження з розчинів $CuSO_4$, $In_2(SO_4)_3$ і SeO_2 в деіонізованій воді при співвідношенні компонентів Cu:In:Se як 1: 5: 3 і pH »1,2-2,0.

Ще один перспективний матеріал для фотовольтаїки - телурид кадмію (CdTe). У нього майже ідеальна ширина забороненої зони (1,44 еВ) і дуже висока здатність до поглинання випромінювання. Плівки CdTe досить дешеві у виготовленні. Крім того, технологічно нескладно отримувати різноманітні сплави CdTe с Zn, Hg і іншими елементами для створення шарів з заданими властивостями.

Подібно $CuInSe_2$, найкращі елементи на основі CdTe включають гетероперехід з CdS в якості віконного шару. Оксид олова використовується як прозорий контакт і покриття, що просвітлює. Серйозна проблема на шляху застосування CdTe - високий опір шару p-CdTe, що призводить до великих внутрішніх втрат. Але вона вирішена в p-i-n-структурі з гетеропереходом CdTe / ZnTe (рис.1.10).

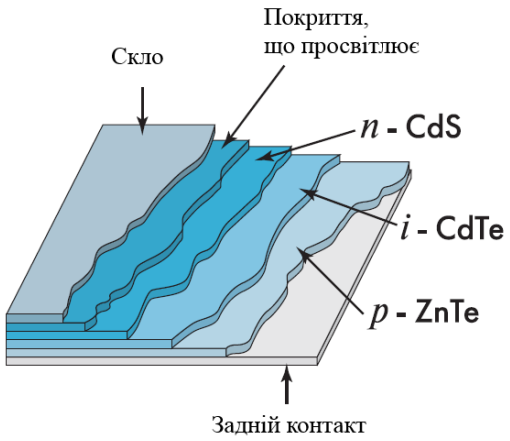


Рисунок 1.10 – Структура сонячного елемента на основі CdTe

Найбільш відповідальний етап формування СЕ на основі CdS / CdTe - осадження поглинаючого шару CdTe товщиною 1,5-6 мкм. Для цього використовують різні способи: сублімацію / конденсацію, електрохімічне осадження, трафаретний друк, хімічне осадження з газової фази і розпорошення. Плівки CdTe, отримані даними методами, мають високу рухливість носіїв заряду, а СЕ на їх основі - високими значеннями ККД, від 10 до 16%.

$CuGaSe_2$ ще дуже цікавий як тонкоплівковий елемент сонячних батарей. Завдяки забороненій зоні шириною 1,68 еВ він використовується як верхній елемент тандемной сонячної батареї з нижнім елементом із $CuInSe_2$. Шари $CuGaSe_2$ формують шляхом послідовного осадження термічним випаровуванням тонких шарів Ga, Se і Cu на поверхню скляної підкладки, покритої шаром молібдену товщиною 1 мкм (рис.1.11). Далі з отриманої структури в установці швидкого термічного відпалу протягом п'яти хвилин при температурі 550 С отримують з'єднання $CuGaSe_2$.

Одним з перспективних матеріалів для дешевих сонячних батарей завдяки привабливій ширині забороненої зони (1,4-1,5 еВ) і великим коефіцієнтом поглинання 10^4 $см^{-1}$ є Cu_2ZnSnS_4. Його головна перевага в тому, що входять до нього компоненти широко поширені в природі і нетоксичні.

Однак поки досягнута ефективність перетворення всього в 2,3% при використанні гетеропереходу Cu_2ZnSnS_4і CdS / ZnO.

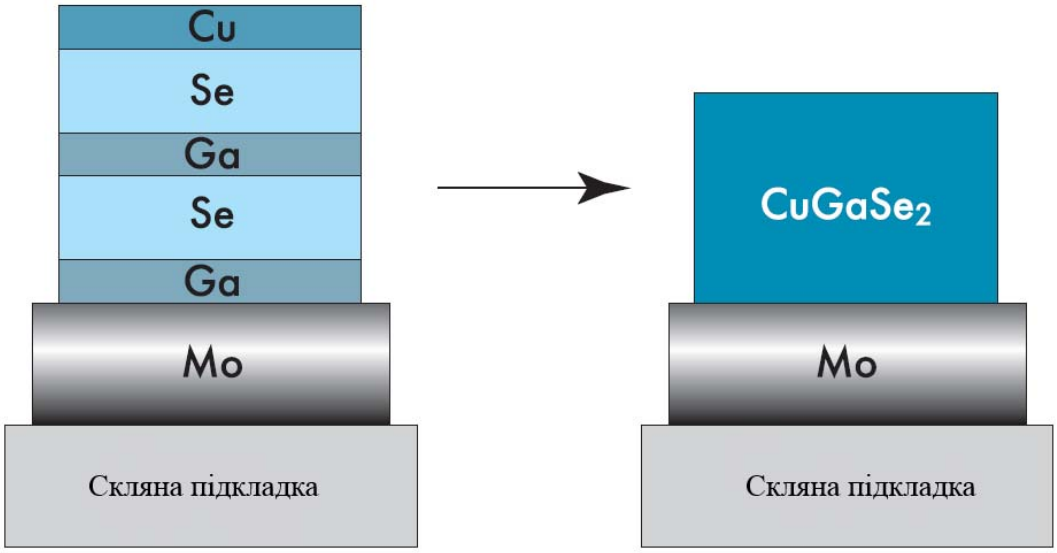


Рисунок 1.11 – Отримання плівок $CuGaSe_2$

Серед СЕ особливе місце займають батареї, що використовують органічні матеріали [6]. Зокрема, ККД СЕ на основі діоксиду титану, покритого органічним барвником, дуже високий ~ 11%. Важливо, що підкладками в таких елементах можуть виступати полімерні плівки.

Основа СЕ даного типу - ширококутного напівпровідника, зазвичай TiO_2, покритий моношаром органічного барвника, як правило - цис-$(NCS)_2$біс(4,4' – дікарбоксі - 2,2'біпірідін) - рутеніем (II) (рис.1.12).

Фотоелектрод такого пристрою є нанопориста плівка TiO_2 товщиною 1 мкм, осаджену на ТСО на склі. Відбиваючим електродом служить тонкий шар Pt, осаджений на ТСО на склі. Простір між двома електродами заповнюють електролітом, зазвичай містить йодид / трііодід (I^- / I_3^-).

Принцип роботи елемента заснований на фотозбуджені барвника і швидкої інжекції електрона в зону провідності TiO_2. При цьому молекула барвника окислюється, через елемент йде електричний струм і на платиновому електроді відбувається відновлення трііодіда до йодиду. Потім

йодид проходить через електроліт до фотоелектроду, де відновлює окислений барвник.

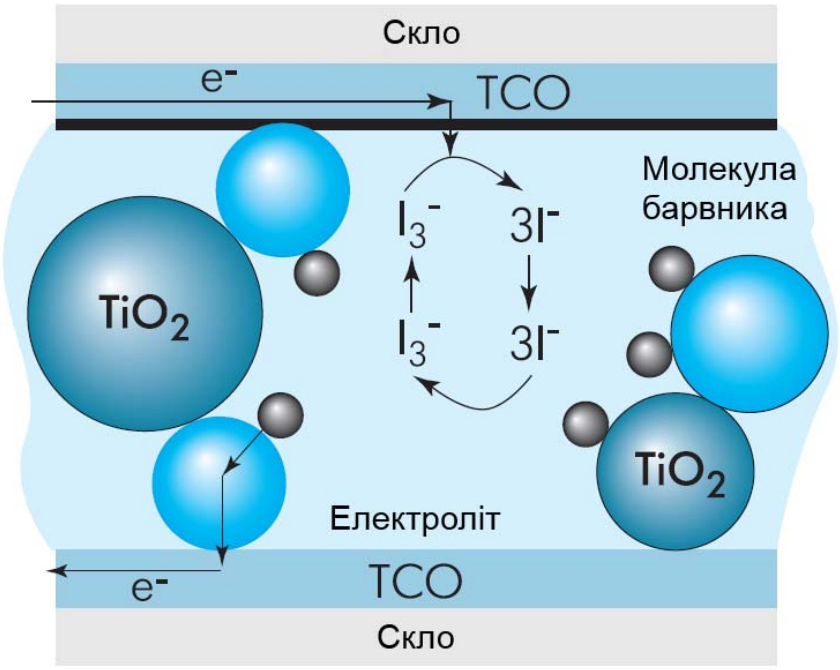


Рисунок 1.12 – Сонячна батарея на основі органічних матеріалів

Для сонячної батареї на ефекті Шотки використовують фталоцианін - органічний напівпровідник p-типу. У ньому найбільш приваблюють висока фотопровідність у видимій області спектра і термічна стабільність [7]. Основний недолік - низька тривалість життя носіїв внаслідок великої кількості пасток. Для підвищення часу життя фталоцианін легують фулеренами або 2, 4, 7-трінітрофлуорененом, створюють акцепторні рівні.

Фулерени (C60) також дуже перспективні для органічних сонячних батарей на основі гетероструктур C60 / p-Si и в зв'язку з їх здатністю до сильного поглинання в короткохвильовій області сонячного спектра [8]. Полікристалічний фулерен C60 товщиною ~ 1 мкм осаджують на кремнієву підкладку в глибокому вакуумі. Далі на шар C60 наносять алюмінієві контакти. В якості заднього контакту використовується сплав Ga_xIn_y на позолоченій підкладці.

Термофотовольтаїчне виробництво електроенергії, тобто перетворення довгохвильового (теплового) випромінювання за допомогою фотовольтаїчних комірок було відкрито в 1960 році і викликає все більший інтерес, особливо в зв'язку з сучасними досягненнями в області створення вузькозонних напівпровідників. У термофотовольтаїчній комірці (рис.1.13) тепло перетворюється в електроенергію за допомогою селективних емітерів з оксидів рідкісноземельних елементів - ербію і ітербію. Ці речовини поглинають інфрачервоне випромінювання і знову випромінюють його в вузькому енергетичному діапазоні. Випромінювання може бути ефективно перетворено за допомогою фотовольтаїчної комірки з відповідною шириною забороненої зони. Як матеріал для фотоелектричної комірки найбільше підходить $In_xGa_{1-x}As$, оскільки він дозволяє домогтися необхідної ширини забороненої зони.

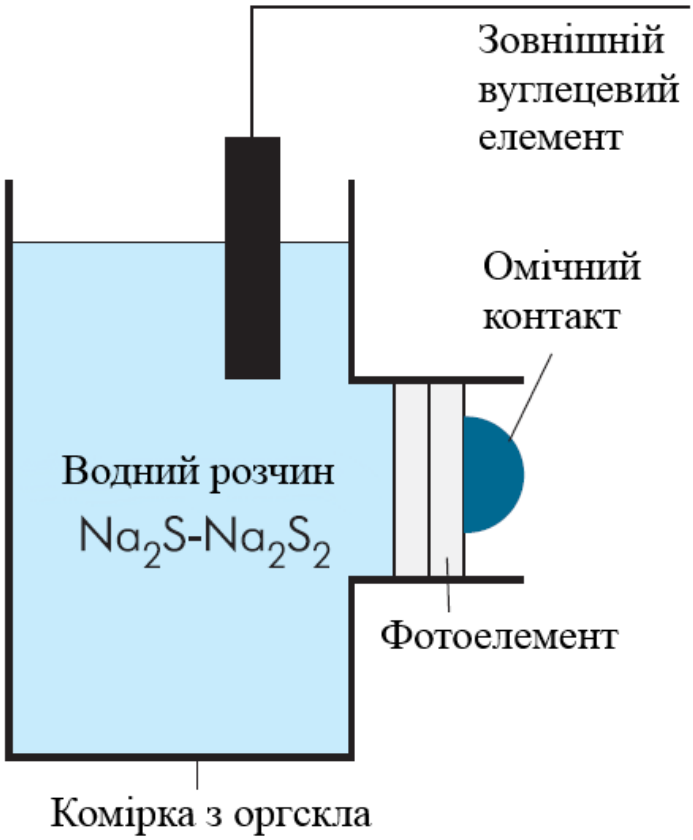


Рисунок 1.13 – Схема термофотоелектричного сонячного елемента

1.4 Каскадні сонячні елементи

Більшість сучасних СЕ мають однин p-n-перехід. В такому елементі вільні носії заряду створюються тільки тими фотонами, енергія яких більше або дорівнює ширині забороненої зони. Іншими словами, фотоелектричний відгук одноперехідного елемента обмежений частиною сонячного спектра, енергія якого вище ширини забороненої зони, а фотони меншої енергії не використовуються. Подолати це обмеження дозволить багатошарові структури з двох і більше СЕ з різною шириною забороненої зони. Такі елементи називаються багатоперехідними, каскадними або тандемними [2, 9, 10]. Оскільки вони працюють зі значно більшою частиною сонячного спектра, ефективність фотоелектричного перетворення у них вище.

У типовому багатоперехідному сонячному елементі (рис.1.14) поодинокі фотоелементи розташовані один за одним таким чином, що сонячне світло спочатку потрапляє на елемент з найбільшою шириною забороненої зони, при цьому поглинаються фотони з найбільшою енергією. Пропущені верхнім шаром фотони проникають в наступний елемент з меншою шириною забороненої зони і т.д.

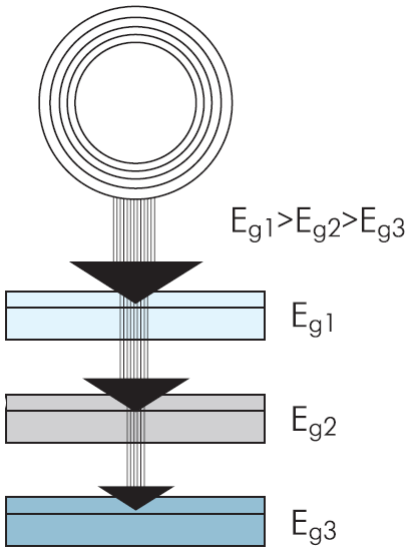


Рисунок 1.14 – Принцип побудови багатоперехідного сонячного елемента

Основний напрямок досліджень в області каскадних елементів пов'язано з використанням арсеніду галію в якості одного або декількох компонентів. Ефективність перетворення подібних СЕ досягає 35%. Крім того в каскадних елементах широко застосовуються аморфний кремній, сплави на його основі (a-$Si_{1-x}C_x$: H, a-$Si_{1-x}Ge_x$: H), а також $CuInSe_2$.

На рис.1.15 зображена каскадна батарея, в якій верхнім елементом служить структура на основі GaInP с n-AlInP в якості вікна, далі йде тунельний діод на GaAs для проходження носіїв між елементами і нижній елемент з GaAs.

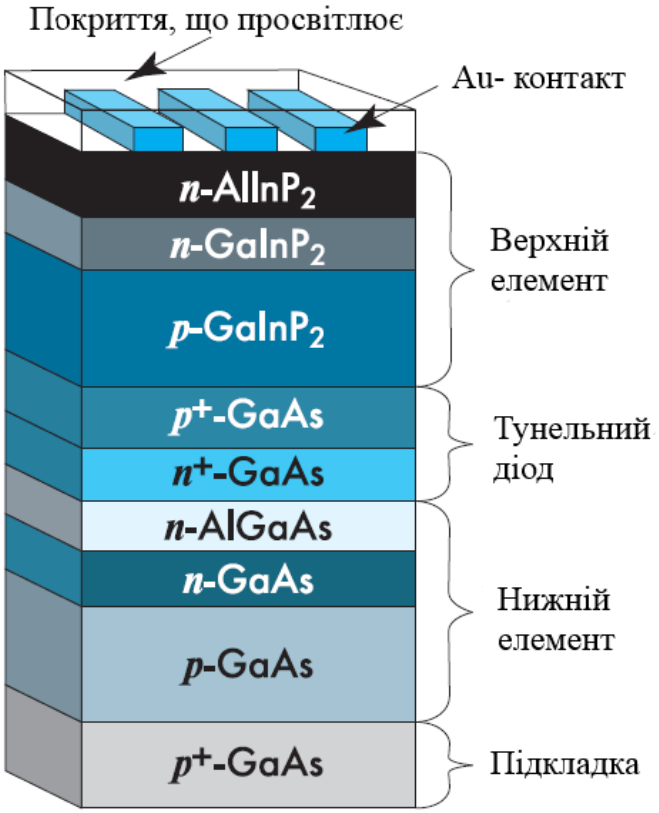


Рисунок 1.15 – Каскадний елемент

Дуже перспективні каскадні батареї, що складаються з трьох елементів з різною шириною забороненої зони (рис.1.16) [9, 10]. Верхній шар, який поглинає короткохвильову область сонячного спектра, сформований із сплаву на основі a-Si:H з шириною оптичної щілини 1,8 еВ. Для серединного елемента в якості шару і-типу використаний сплав a-SiGe: H з вмістом

германію ~ 10-15%. Ширина оптичної щілини даного шару (1,6 еВ) ідеальна для поглинання зеленої області сонячного спектра. Нижня частина СЕ поглинає довгохвильову частину спектру, для цього використовується і-шар a-SiGe:H з концентрацією германію 40-50%. Світло яке не поглинається відбивається від заднього контакту на основі Ag / ZnO. Всі три елементи каскадної сонячної батареї пов'язані між собою сильно легованими шарами, що утворюють тунельні переходи між сусідніми елементами.

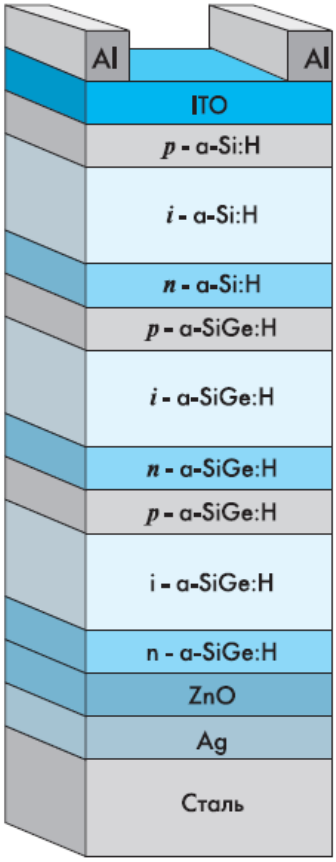


Рисунок 1.16 – Трикаскадний сонячний елемент на основі сплавів a-SiGe: H

1.5 Сонячні елементи для космонавтики

Приклад практично безальтернативної області застосування СЕ - космічні апарати. Але при такому їх використанні до них пред'являється ряд вимог, пов'язаних з загальною вагою і об'ємом системи, точністю

позиціонування батареї щодо положення Сонця, часом життя і швидкістю деградації батарей. Актуальними є також висока ефективність і низька вартість СЕ. Ці вимоги ініціювали розробки багатоперехідних батарей на основі InGaP / GaAs (ККД 22%), InGaP / GaAs / Ge (ККД - 24%) і InGaAlP / GaAs / InGaAsN / Ge з теоретичною ефективністю перетворення до 42% [11]. Очевидно, що зростання ефективності перетворення веде до зниження габаритів сонячних батарей, а отже, і загальної ваги космічного апарату (рис.1.17). В результаті вартість запуску космічних апаратів істотно знижується (табл.1.1).

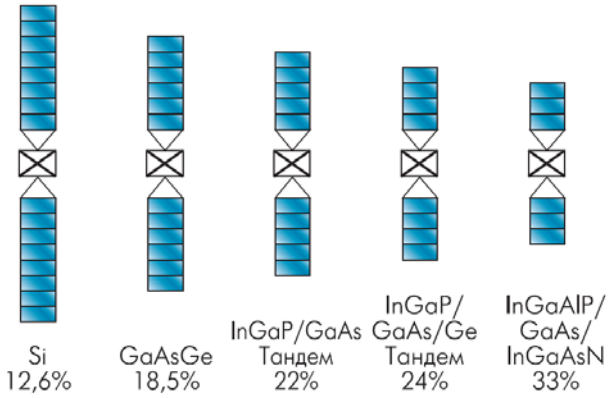


Рисунок 1.17 – Розміри панелей сонячних батарей для космічних апаратів

Таблиця 1.1 – Техніко-економічні показники сонячних батарей для космічних апаратів

Параметр	GaInP/GaAs/Ge	GaAs/Ge	Si
Питома потужність, Вт/кг	22	19	14
Необхідна потужність, Вт	10000	10000	10000
Розрахункова маса сонячної батареї, кг	455	526	714
Економія коштів запуску в порівнянні з батареями на кристалічному Si, дол. США	5126128	3720896	0

1.6 Майбутнє фотовольтаїки

Тенденції розвитку технологій, застосування і ринку фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії досить суперечливі. Підставою для оптимізму може служити інтенсивність розвитку даної галузі в останні кілька років (табл.1.2) [12]. Зокрема, в 1997 році рівень продажів перевищив рівень 1996 року в 42% і склав 126 МВт. Загальна ємність встановлених сонячних батарей в усьому світі перевищує 800 МВт. Причому в рівній мірі розширюється застосування СЕ як в традиційних областях (телекомунікації, побутові джерела електроенергії, невеликі джерела світла), так і в системах, підключених до загальних електричних мереж.

Таблиця 1.2 – Тенденції розвитку технологій сонячних батарей

Країна	1997 р.	1998 р.	1999 р.	2000 р.
Монокристалічний Si				
США	67,1	93,5	114,6	134,7
Японія	35	52	67	82
Європа	45	54	99	104
Інші країни	16,2	16,3	16,3	16,3
Всього МВт	163,3	215,3	296,9	337
CdTe, $CuInSe_2$				
США	0,8	12,7	23,8	34,4
Японія	2,0	7,0	7,0	15,0
Європа	0,2	0,2	10,2	15,2
Інші країни	0	0	0	0
Всього МВт	3	19,9	41	64,6
a-Si				
США	17,7	18,5	20,5	37
Японія	11	23	40	54
Європа	2	2	2	2
Інші країни	3	5,5	5,5	5,5
Всього МВт	33,7	49	68	89,5

Однак багато спостерігачів розглядають зростання ринку як нестабільний в зв'язку з тим, що він більшою мірою носить «політичний» характер, ніж економічний. Так, одна з причин феноменального росту фотовольтаїки в Японії - діюча урядова програма, яка пропонує податкові пільги і субсидії виробникам сонячних батарей, що монтуються на дахах будинків. Тільки в 1997 році було встановлено 9400 таких систем, до кінця 2000 року їх число перевищить 70 тис.

Європейська промисловість за 1997 рік збільшила виробництво СЕ на 56% (з 18,8 до 30,4 МВт). Виробники Німеччини отримали урядову фінансову підтримку, яка дозволила в поточному році довести обсяг випуску СЕ до 40 МВт. У США - основному світовому постачальнику сонячних батарей (їх частка становить близько 42%) - діє програма «мільйон сонячних дахів», що дозволяє з оптимізмом дивитися на розвиток фотовольтаїки в цій країні. Однак «політичний» ринок не може існувати без громадської підтримки, яка, як показують проведені опитування, залишається стабільною. Тому основне завдання маркетингу СЕ на сьогодні - використовувати урядову підтримку (як в США, ФРН і Японії) для створення здорового ринку, на якому вироби фотовольтаїки зможуть жити і без залучення інвестицій.

Основною ж проблемою на шляху широкого поширення виробів фотовольтаїки досі залишається їх порівняно висока вартість. Співвідношення ціна / продуктивність за 1997 рік зросла з 4,15 до 4,20 дол. / Вт. Однак така тенденція вважається короткочасної і пов'язаної з розширенням виробництва.

Таким чином, основні тенденції розвитку технологій, застосування і ринку перетворювачів сонячної енергії показують, що у них є багатообіцяюче майбутнє. Виробників стимулює потенційно гігантський ринок сонячних батарей, встановлених на дахах будівель. Зростаючий інтерес до виробів фотовольтаїки для космонавтики, телекомунікацій і портативних джерел живлення також є ключовим фактором розвитку галузі в цілому. Основні зусилля дослідників зосереджені на підвищенні

стабілізованою ефективності фотоелектричного перетворення, зниженні вартості матеріалів і виробництва, підвищення надійності приладів, на впровадженні нових тонкоплівкових технологій разом з розвитком моно- і полікристалічних технологій, поки що домінують на ринку. Тривають розробки по стандартизації якості і продуктивності виробів фотовольтаїки, включаючи стандарти ISO9001 і ISO14001.

1.7 Основні елементи фотовольтаїчної систем

Більшість фотовольтаїчних систем являють собою плоскі сонячні перетворювачі, в яких сонячна енергія збирається безпосередньо модулями. Такі системи є, як правило, статичними з фіксованою орієнтацією, але може використовуватися і система стеження за сонцем.

В цілому фотовольтаїчні системи складаються з модулів, з'єднані окремими сонячними елементами, що генерують електрику, так званого балансу системи (balance-of-system - BOS), тобто частини фотовольтаїчної системи за винятком сонячних елементів, що включає кабельне з'єднання, опорні конструкції, акумулятори, контролер заряду, електронну частину, перетворювач постійного на змінний струм і ін. Деякі з компонент балансу системи не є обов'язковими для фотовольтаїчних систем.

Наприклад, до складу більшості автономних систем входять акумулятори, які заряджаються в денний час доби, в той час як сонячні елементи працюють і постачають споживачам електроенергією в темний час доби. При цьому акумулятори можуть бути відсутні в системах, підключених до центральної енергетичної мережі, яка в даному випадку є «віртуальним акумулятором».

До складу фотовольтаїчних систем з концентрацією випромінювання входять системи точного стеження за Сонцем. Причому точність стеження повинна підвищуватися зі збільшенням концентрації випромінювання. В цьому випадку потрібно створення спеціальних опорно-поворотних

пристроїв, оснащених датчиками положення Сонця і електроприводами. У таких фотовольтаїчних системах потрібно примусове охолодження, для чого при невисоких концентраціях випромінювань використовуються мідні радіатори. У разі високих концентрацій потрібно вже водяне охолодження [13].

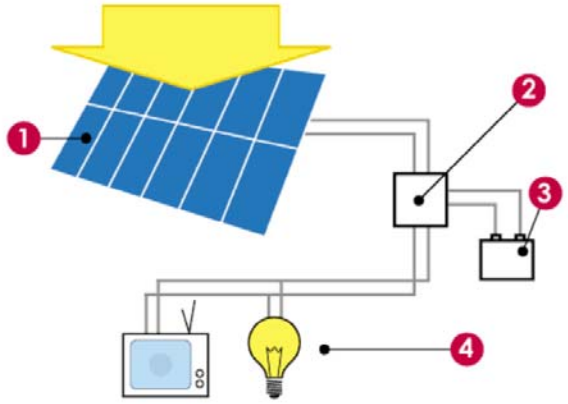
1.8 Схемо-технічні рішення

Для того щоб фотоелектричні модулі були надійним джерелом електроенергії, необхідні додаткові елементи в системі: кабелі, що підтримує структура і, в залежності від типу системи (поєднана з мережею, автономна або резервна), ще електронний інвертор і контролер заряду з акумуляторною батареєю. Така система в цілому називається сонячною фотоелектричною системою, або сонячної станцією.

Є три основних типи сонячних фотоелектричних систем:

- автономні системи;
- сполучені з мережею системи;
- резервні системи.

Автономні фотоелектричні системи використовуються там, де немає мереж централізованого електропостачання. Для забезпечення енергією в темний час доби або в періоди без яскравого сонячного світла необхідна акумуляторна батарея. Такі системи часто використовуються для електропостачання окремих будинків. Малі системи дозволяють живити базове навантаження (освітлення і іноді телевізійний або радіоприймач). Більш потужні системи можуть також живити водяний насос, радіостанцію, холодильник, електроінструмент. Приклад системи представлений на рис. 1.18

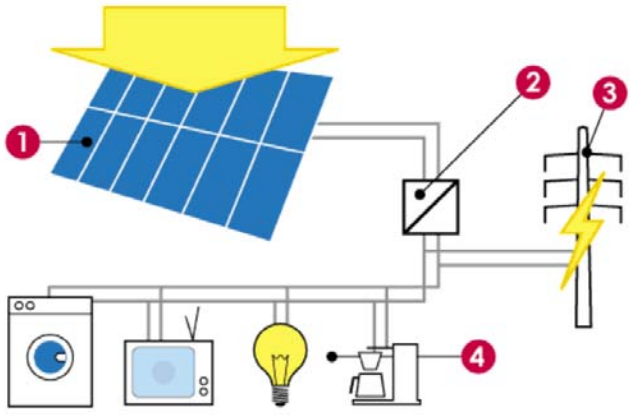


1 - сонячні панелі; 2 - контролер; 3 - акумулятори; 4 – навантаження

Рисунок 1.18 – Автономна фотоелектрична система

Коли є мережа централізованого електропостачання, сонячні панелі можуть бути з'єднані з мережею. За умови підключення достатньої кількості фотоелектричних модулів, певна частина навантаження в будинку може живитись від сонячної електрики.

Сполучені з мережею фотоелектричні системи зазвичай складаються з одного або багатьох модулів, інвертора, кабелів, підтримуючої структури і електричного навантаження. Приклад з'єднаної з мережею фотоелектричної системи представлений на рис. 1.19.



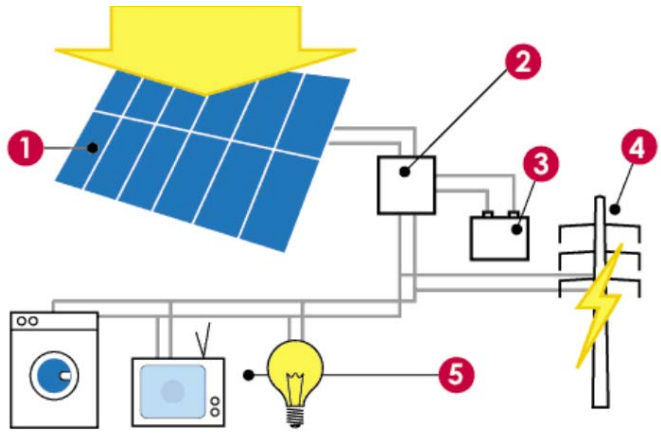
1 - сонячні панелі; 2 - інвертор; 3 - мережа; 4 - навантаження

Рисунок 1.19 – Об'єднана з мережею фотоелектрична система

Інвертор використовується для з'єднання фотоелектричних панелей з мережею. Існують також так звані АС-модулі, в яких інвертор вбудований на задній частині модуля. Сонячні панелі можуть бути встановлені на даху будівлі під оптимальним кутом нахилу за допомогою підтримуючої структури або алюмінієвої рами.

Резервні сонячні системи використовуються там, де є з'єднання з мережею централізованого електропостачання, але мережа ненадійна. Резервні системи можуть використовуватися для електропостачання в періоди, коли немає напруги в мережі. Малі резервні сонячні системи електропостачання найбільш важливого навантаження - освітлення, комп'ютер і засоби зв'язку (телефон, радіо, факс і т.і.).

Більші системи можуть також забезпечувати енергією і холодильник під час відключення мережі. Чим більше потужність необхідна для живлення навантаження, і чим довше періоди відключення мережі, тим більша потужність фотоелектричної системи необхідна. Приклад подібної системи представлений на рис. 1.20.



1 - сонячні панелі; 2 - інвертор; 3 - акумуляторна батарея; 4 - мережа; 5 – навантаження

Рисунок 1.20 – Резервна фотоелектрична система

Система складається з фотоелектричних модулів, контролера, акумуляторної батареї, кабелів, інвертора, навантаження і підтримуючої структури.

Дані варіанти компоновки системи підійдуть для резервування власних потреб атомних електростанцій (АЕС), що дозволить підтримувати працездатність станції при надзвичайних ситуаціях, знижуючи тим самим ризики виникнення аварії [14].

1.9 Акумуляторні батареї

Сучасні виробники випускають сонячні батареї для опалення, внутрішнього і вуличного освітлення, а також для інших побутових і виробничих потреб (потреб). Кожне пристрій оснащений певним акумулятором, призначеним для накопичення енергії, яку виробляють сонячні батареї. Завдяки цьому користуватися їхньою енергією можна навіть вночі. При великих навантаженнях і в похмуру погоду акумулятор підживлює систему, тим самим забезпечуючи електропостачання будинку та прилеглої до нього ділянки [15].

Акумуляторні батареї (АКБ) повинні володіти:

- здатністю до самостійного заряду;
- максимально можливим діапазоном температур;
- максимальної з асортименту вибору величиною струму;
- стійкістю до ударів корпусу;
- габаритною компактністю.

А також для тривалого використання АКБ потрібно дотримуватись наступного:

- по можливості рекомендується розряджати АКБ тільки на 50%;
- створити умови робочих температур не менше 20° С (це знизить величину саморозряду);

- у акумуляторів для сонячних батарей термін служби легко підрахувати на підставі числа циклічності. При цьому слід врахувати, що для свинцевих моделей придатними до роботи вважаються АКБ, ємність яких зберігається на рівні не менше 60-65% від номіналу;

- вибирати інвертор з високим ККД;

- не встановлювати накопичувачі під прямі промені сонця;

- перевірку щільності електроліту слід проводити регулярно;

- найдешевші акумулятори доцільно використовувати тільки для сонячних батарей, зібраних своїми руками за мінімальну вартість (середня ціна системи в цьому випадку становить близько 100 доларів).

Найбільш широко поширені акумулятори на 12 В, і саме з них зазвичай збираються акумуляторні батареї на будь-яку напругу, кратне цієї величини, в тому числі 24, 48 і 96 В.

При робочій напрузі, що перевищує 12 В, кілька акумуляторів з'єднуються послідовно таким чином, щоб сума їх номінальних напруг відповідала необхідному номінальній напрузі блоку. Якщо сили струму або запасу енергії однієї такої збірки не вистачає, то кілька збірок з'єднуються паралельно, поки їх сумарні параметри не досягнуть необхідного порога. Схеми з'єднання акумуляторів представлені на рис. 1.21.

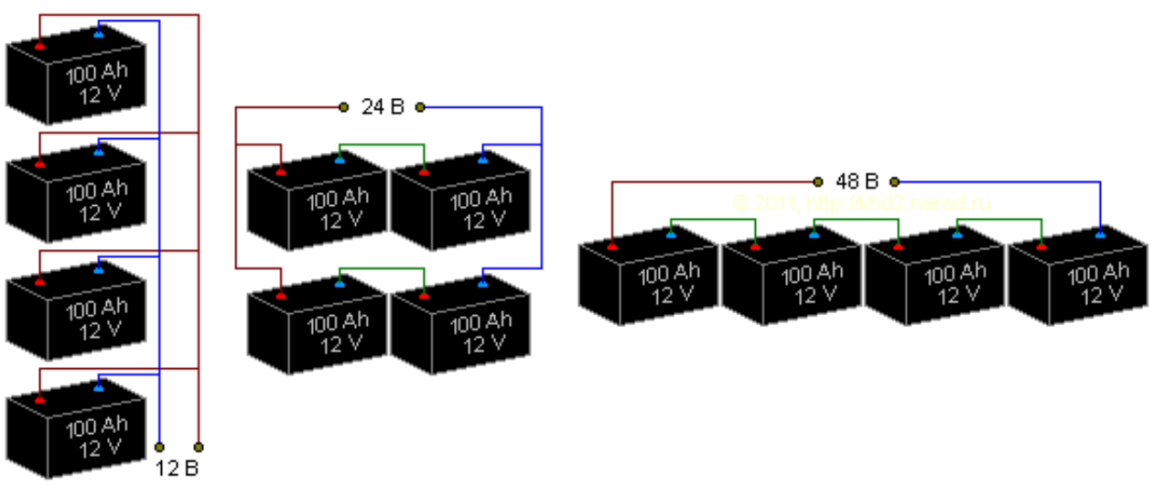


Рисунок 1.21 – Схема збірки блоку акумуляторів з робочим запасом енергії 1-2 кВт / год (в залежності від навантаження) на напругу 12, 24, 48 В

Щоб уникнути виникнення проблем, що можуть призвести не тільки швидким виходом акумуляторів з ладу, але навіть вибухом і пожежею, все акумулятори повинні бути не тільки одного типу і однієї номінальної ємності, але дуже бажано, щоб вони належали до однієї і тієї ж партії! Для акумуляторів, з'єднаних послідовно і входять в одну збірку, ця вимога обов'язкова. Міняти між собою акумулятори з різних збірок після навіть не дуже тривалої експлуатації вкрай небажано. Не можна замінювати новим тільки один акумулятор в збірці - всю збірку слід міняти цілком, і в новій збірці акумулятори також повинні бути з однієї і тієї ж партії.

У зв'язку з цими обмеженнями, чим нижче номінальну напругу блоку акумуляторів, тим зручніше його обслуговувати - в блоці на 12 В акумулятори можна замінювати і додавати по одному, на 24 В - тільки парами, на 48 В - відразу четвірками, а на 96 В - по 8 штук одночасно. Основних параметрів вибору всього чотири.

1. Ємність. У різних виробників накопичувачів існує важлива відмінність у маркуванні ємності. Стосується воно номіналу – розрахованого на 10 або 20 годин розрядки (вказано на етикетці або корпусі). Очевидно, що в першому випадку абсолютна ємність вище.

2. Маса. При однаковому номіналі АКБ з більшою масою (для свинцевих моделей) мають кращі параметри циклічності і реальної накопичувальної здатності.

3. Кількість циклів (для очікуваної глибини розрядки у відсотках). Вибирати акумулятор для сонячних панелей рекомендується з максимальним запропонованим числом.

4. Термін служби. Тут можна застосувати аналогічне правило. При наявності достатніх коштів перевагу краще віддати сучасним літій-іонним варіантам, а при фінансових обмеженнях на покупку – GEL (або AGM зі збільшеним до 10 років періодом працездатності).

Головною характеристикою будь-якого накопичувача є тип використаної в ньому робочої речовини. За даним параметром вони діляться на п’ять основних видів (включаючи різновиди) [16].

1. Кислотні акумулятори для сонячних батарей. Прийнято розрізняти три їх підкласи:

- автомобільні варіанти. Функціонують нестабільно. В силу особливостей роботи сонячної електростанції (СЕС), класична рідко-кислотна система буде недовговічною (максимум – 50 циклів), і тому її використання для домашніх електростанцій недоцільно;

- накопичувачі OPzS. Їх конструктивна особливість – трубчастий анод, здатний у декілька разів збільшити кількість циклів «зарядка / розрядка». Головний недолік – висока ціна в порівнянні з класичною автомобільною АКБ;

- AGM (ABSORPTION GLASS MATT). Отримали свою назву через заливку електроліту в абсорбуючі склопакети. Переваги: можливість монтажу в будь-якому положенні, короткий час підзарядки при високому рівні заряду, стабільність роботи в погано вентильованих приміщеннях, нечутливість до неповного заряджання, невисока вартість. Недоліки: скорочений діапазон прийнятних температур (15 до 25° С), недовгий термін служби (до 5, рідко – до 10 років), вихід з ладу при перевищенні 100% допустимого заряду. Число циклів розрядки для стандартних моделей – 200 (повний розряд), 350 (половинний), 800 (при розрядці на третину), велика вага.

2. Лужні акумулятори для сонячних батарей. Цілком прийнятними експлуатаційними характеристиками володіють лужні моделі. Вони добре переносять глибокі розряди в широкому діапазоні значень, досить великі за габаритами і мають «ефект пам’яті». До недоліків слід віднести часткову втрату ємності в разі неповної розрядки.

3. Гелеві акумулятори для сонячних батарей. Електроліт в GEL-накопичувачах являє собою желеподібну масу, що захищає АКБ від

протікань, свинцеві пластини – від осипання, і гарантує відсутність випаровування отруйних речовин. У порівнянні з AGM варіанти з гелем дорожчі, але на 50-70% ефективніші: кількість циклів – 350 (повний розряд), 550 (половинний), 1200 (при розрядці на третину).

Додаткова перевага – здатність без шкоди для характеристик перебувати в повністю розрядженому стані до 3-5 діб.

4. Літієві акумулятори для сонячних батарей. Більш сучасним типом є АКБ на основі літію. Їх висока, в порівнянні зі свинцевими АКБ, вартість повністю окупається наступним рядом переваг:

- маса – в 3-4 рази менше;
- щільність енергії – більше майже в 3 рази;
- питома енергетика – вище в 4 рази;
- число циклів «зарядка / розрядка» – від 3000 до 6000 (повний розряд);
- діапазон температур – ширше в 5 разів;
- термін служби – до 20 років;
- екологічна безпека при експлуатації – повна.

1.10 Контролер сонячного заряду

Завдання електронного пристрою – контролювати процес зарядки накопичувачів в світлий час доби і їх розрядки при відсутності світла, не допускати збоїв і стрибків напруги в системі.

Відсутність даного елемента в системі призведе до видачі в мережу максимальної напруги задовго до зарядки АКБ. Це не тільки знизить ефективність роботи системи, а й негативно позначиться на експлуатаційних характеристиках обладнання.

Різні схеми формування СЕС передбачають встановлення контролера заряду акумулятора для сонячної батареї одним з трьох способів: в блоках живлення, інверторах або як самостійний елемент.

Основною проблемою наземних СЕС (на відміну від панелей, розгорнутих в космосі) є неможливість цілодобової генерації енергії в безперервному режимі. Наслідок цього – необхідність використання проміжних накопичувачів і максимізація їх ефективності. Однак уникнути неповної зарядки АКБ в таких системах – завдання технічно складне і дороге. А тому питання про те, який саме контролер заряду для сонячних батарей використовувати, вирішується в залежності від продуктивності та очікуваних від СЕС витрат і прибутків в цілому (табл 1.3).

Таблиця 1.3 – Співвідношення різних типів контролерів до їх характеристик.

Тип контролера	Недопущення перегріву АКБ	Забезпечення 100% заряду	Забезпечення max ефективності	Функціональність
On / Off	+	–	–	низька
PWM	+	+	–	висока
MPPT	+	+	+	дуже висока
гібридний	+	+	+	висока

Компромісом являється вибір одного з наступних варіантів:

1. Пристрої On / Off. Контролер заряду для сонячної батареї типу On / Off – простий і недорогий варіант з єдиною основною функцією: переривання зарядки акумулятора при виході на максимальну напругу. Головна перевага такого пристрою – гарантія того, що акумулятор не перегріється під час роботи і не вийде з ладу. Недолік – в постійному недоборі повного заряду, використанні в середньому тільки 2/3 ємності накопичувача і зниження на третину часу його служби.

2. Системи PWM (ШІМ (контролери з широтно-імпульсною модуляцією)). Схема, яка використовує контролер заряду для сонячної

батареї типу PWM (ШІМ) дозволяє знижувати (модулювати) силу струму, так АКБ заряджається довше, але заряд набирає повністю. Таким чином можна продовжити термін служби накопичувачів і підвищити їх ефективність.

3. MPPT регулятори. Для власників сонячних систем високої потужності і продуктивності питання про те, який контролер вибрати для своєї сонячної батареї вирішується просто. Альтернативи MPPT (Maximum power point tracking for low power photovoltaic solar panels) тут немає – це пристрій на 30-35% ефективніше будь-яких інших типів. Контролер сонячної батареї такого типу працює як штучний інтелект, за складним алгоритмом в режимі реального часу обчислюючи максимальну ефективність всієї системи і коригуючи напругу і силу струму для виходу на оптимальні потужності. На жаль, MPPT-контролери недешеві, і тому в невеликих домашніх СЕС частіше за інших використовуються PWM-моделі.

4. Гібридний тип. Контролер заряду сонячних батарей гібридного типу рідко використовується в «чистих» системах. Його підключення найбільш ефективно в системах «фотоелементи + вітрогенератори», де сила струму – часто змінна величина, і існує необхідність вирівнювати навантаження на АКБ.

1.11 Інвертор

До СЕС підключається значна кількість найрізноманітнішої промислової та побутової техніки, що працює на змінному струмі. Але сонячні панелі генерують тільки постійний струм. Роль інвертора в сонячній електростанції – це перетворення постійного струму в змінний для забезпечення роботи ламп освітлення, опалювальних котлів, телевізорів, комп’ютерної техніки, пральних машин та іншої електроніки.

Інвертори для сонячної електростанції відрізняються технічними характеристиками, виробником, ціною, потужністю і т.і.

- автономні. Працюють незалежно від стану електричних мереж;

- мережеві. Функціонують при роботі і з електромережею, і з фотоелектричними панелями. Контролюють якість і кількість енергії і передають її надлишок в зовнішню мережу;

- комбіновані. Поєднують функції автономного та мережевого інвертора. Режим роботи приладу регулюється автоматично або індивідуально, за допомогою ручного налаштування.

При виборі інвертора для сонячної електростанції необхідно врахувати наступні критерії:

1. Вхідна напруга. Параметр пов’язаний з потужністю перетворювача. При зростанні вихідних показників зростає і вхідний струм, що негативно позначається на роботі та довговічності транзисторів, а також сприяє значним втратам на сполучних кабелях. Щоб запобігти цьому процесу, найчастіше використовуються інвертори з напругою 12/24/48 В при відповідних потужностях в діапазонах менш як 0,6 кВт, від 0,6 до 1,5 кВт і більше 1,5 кВт.

2. Номінальна і максимальна потужність. Номінальний показник повинен відповідати сумі потужностей всієї техніки, яка буде споживати струм одночасно. Але зазвичай інвертор вибирають за максимальними параметрами сукупної потужності всіх приладів споживання в системі.

3. Форма вихідного струму – прямокутна, синусоїдальна, квазі-синусоїдальна. Перший варіант не витримує індуктивні навантаження, тому кращими та найбільш надійними вважаються інвертори з формою чистого синуса. Квазісинусоїда є проміжним варіантом між прямокутником та чистим синусом.

4. Маса. Для неякісних перетворювачів застосовують схему, яка не містить трансформаторів, тому такі прилади мають невелику вагу. Надійний інвертор для сонячної електростанції – важкий, бо в його конструкцію обов’язково входить вихідний трансформатор.

5. Наявність вентилятора. Необхідно знати, в яких ситуаціях запускається прилад охолодження і чи можна налаштовувати його швидкість. У сучасних моделей вентилятор при малих навантаженнях не включається зовсім, а при помірних обертається на незначній швидкості, що гарантує безшумне функціонування інвертора.

6. Кількість захисних механізмів. Якісний прилад має захист від перевантаження, замикання, перегріву, максимальної та мінімальної напруги акумулятора і т.і. Ціна пристрою при цьому зростає, але надійність підвищується.

7. ККД. Ефективність використання перетворювачів визначає кількість енергії, яка витрачається виключно на підтримання роботи приладу. ККД прогресивних моделей становить близько 95%. При ефективності інвертора нижче 90%, 10% енергії буде витрачатися тільки на підтримку роботи приладу, що для дорогих систем рівня СЕС дуже низький показник.

8. Споживчі втрати без навантаження. У нормі цей показник становить приблизно 1% від номінальної потужності.

9. Наявність режиму очікування дозволяє заощадити енергію, накопичену в акумуляторних батареях.

10. Оптимальний температурний діапазон роботи. Цей критерій важливий при установці перетворювачів в неопалюваних приміщеннях. Промислові інвертори для сонячних станцій відрізняються широким діапазоном робочих температур – близько 100°С між нижньою і верхньою межами – що є підтвердженням високої якості перетворювача.

1.12 Робота при паралельному та послідовному з’єднанні сонячних панелей

Фотоелектричні комірки часто об'єднують в послідовно-паралельні з'єднання, підвищуючи таким чином одночасно напругу і струм.

Якщо кілька фотоелементів (або паралельних з'єднань декількох фотоелементів) з'єднуються в ланцюг послідовно, то їх вихідна напруга збільшується. При послідовному з'єднанні сонячних елементів (СЕ) всі елементи йдуть ланцюжком і з'єднуються з сусідніми протилежними полюсами (рис. 1.22).

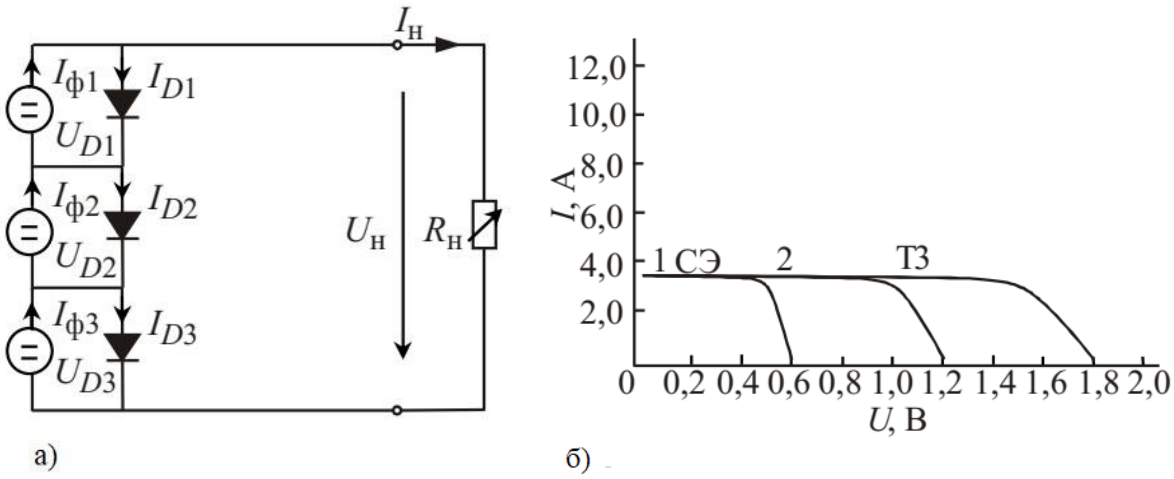


Рисунок 1.22 – Послідовне з'єднання сонячних елементів (а), ВАХ СЕ, з'єднаних послідовно (б)

Наприклад, щоб отримати на виході напругу 220 В достатньо з'єднати паралельно 10 сонячних елементів з вихідною напругою 24 В або 20 - з напругою 12 В. Однак у цього з'єднання є ряд недоліків:

- нестабільне значення напруги при поганій освітленості;

- слабка потужність всієї системи, яка дорівнює потужності однієї батареї.

Часткове затінення модуля в ланцюзі може бути причиною протікання зворотного струму через затінений модуль, викликаючи локальний нагрів і знижуючи загальну продуктивність ланцюга. Байпасний діод підключений паралельно з серією фотоактивних комірок ФЕП в прямому напрямку протікання струму, струм ланцюга (в разі затінення) пройде через діод, тим самим мінімізуючи нагрів модуля і втрати в ланцюзі [17].

Якщо кілька фотоелементів (або послідовних з'єднань декількох фотоелементів) приєднуються паралельно, то максимальна сила струму всіх з'єднаних в ланцюг комірок еквівалентна добутку максимально досяжної сили струму однієї комірки або їх комбінації на кількість комірок або їх комбінацій. При цьому в ідеальному випадку максимальна потужність послідовно-паралельного з'єднання однакових комірок еквівалентна добутку максимальної потужності кожної комірки на кількість комірок [18]. Іншими словами, максимальна потужність (P_{max}) такого з'єднання еквівалентна добутку $V_{вих}$ і I_{max} всього з'єднання.

Насправді потужність отриманої таким чином сонячної батареї буде менше потужності суми потужностей складових її модулів на величину втрат на, так звану неузгодженість, тобто втрат, викликаних відмінністю характеристик однотипних модулів. Тому важливо ретельно підбирати модулі в сонячній батареї, щоб звести до мінімуму втрати потужності на неузгодженість.

При паралельному з'єднанні всі елементи з'єднані паралельно однотипними полюсами (рис. 1.23).

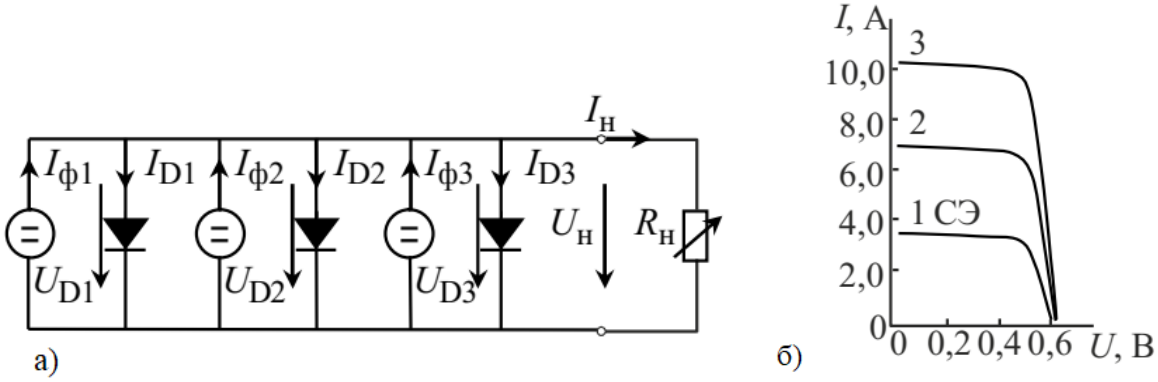


Рисунок 1.23 – Паралельне з'єднання сонячних елементів (а), ВАХ СЕ, з'єднаних паралельно (б)

Хоча подібне з'єднання вимагає використання додаткового перетворювача напруги, воно дозволяє отримати значно більшу електричну потужність і стабільність в роботі.

При паралельному з'єднанні модулів, кожен ряд модулів повинен мати блокуючий діод. Це не тільки зменшує навантаження на окремий діод, але і не дозволяє току з одного паралельно з’єднаного ряду текти в ряд з меншим струмом, що знижує втрати, викликані невідповідністю при паралельному з'єднанні рядів в батареї.

При будівництві сонячної батареї великих розмірів у вигляді матриці (декілька стовпців і кілька рядків) встановлення блокуючих діодів послідовно з кожним елементом дозволяє автоматично «відключати» перегорілі або затінені елементи сонячної батареї і зберегти її працездатність.

1.13 Перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну з допомогою напівпровідникових елементів

Для прямого перетворення сонячного випромінювання в електрику можна використовувати такі напівпровідникові структури: p-n-перехід, гетероперехід, МДН- структуру і контакт метал-напівпровідник. Принцип дії сонячних елементів на їх основі полягає в тому, що кванти сонячного світла з енергією, більшою ширини забороненої зони напівпровідника, створюють пари носіїв заряду: електрони в зоні провідності та дірки у валентній зоні. Ті носії, які створені в області просторового заряду (ОПЗ) або в об'ємі напівпровідника на відстані, меншій або що майже дорівнює дифузійній довжині, поділяються внутрішнім полем. На зовнішніх металевих електродах при цьому з'явиться різниця потенціалів, яка викличе струм через навантажувальний опір. Виникла ЕРС зменшує потенційний бар'єр у напівпровідниковій структурі, що, в свою чергу, призводить до виникнення зустрічних потоків електронів і дірок. Ці потоки еквівалентні потокам в структурах, зміщених в прямому напрямку зовнішньою напругою. Коли

потік створених світлом надлишкових носіїв заряду зрівняється з потоком носіїв заряду, обумовлених виниклої ЕРС, установиться стаціонарний стан.

1.13.1 Ідеальний фотоелемент

Звичайний сонячний елемент (p-n перехід) має лише одну характерну енергію – ширину забороненої зони Eg. Коли на елемент потрапляє сонячне світло, фотони з енергією, меншою Eg, не дають внеску в вихідну потужність елемента (у нехтуванні поглинанням світла, що супроводжується порушенням фотонів). Кожен фотон з енергією, більшою Eg, дає внесок, рівний Eg, у вихідну потужність, а інша частина енергії фотона переходить в тепло. Для того визначення ефективності (або ідеальний ККД) перетворення, на рис. 1.24, а представлена діаграма енергетичних зон освітлюваного p-n переходу.

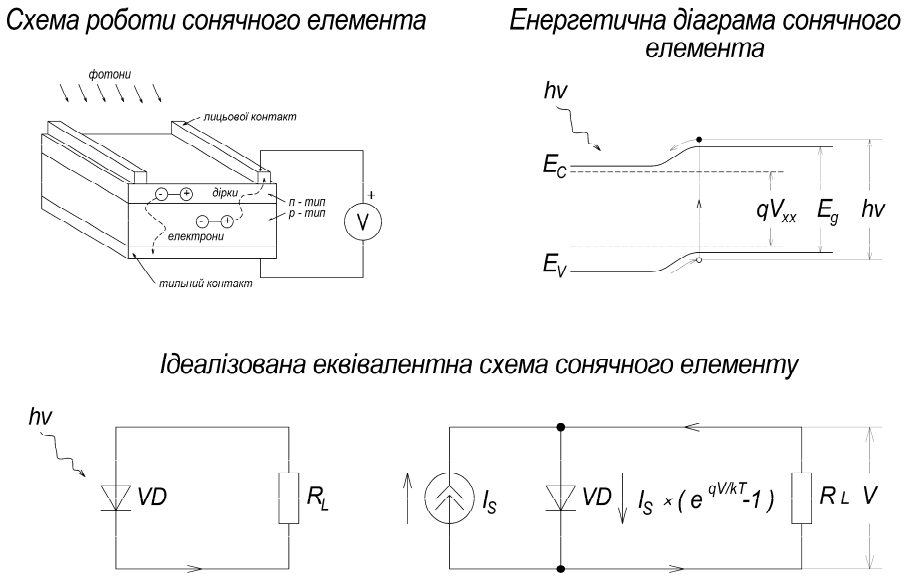


Рисунок 1.24 – Схема роботи та енергетична діаграма сонячного елементу з p-n переходом

Будемо вважати, що сонячний елемент має ідеальну вольт-амперну характеристику. Відповідна еквівалентна схема показана на рис. 1.11,б, де паралельно переходу введене джерело постійного струму I_L, описує

збудження нерівноважних носіїв сонячним випромінюванням. Вольт-амперна характеристика такого приладу визначається виразами:

$$I = I_s\left(e^{qV/kT} - 1\right) - I_L \tag{1.1}$$

і

$$J_s = I_s / A = qN_C N_V\left(\frac{1}{N_A}\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D}\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}\right)e^{-Eg/kT}, \tag{1.2}$$

де А – площа приладу.

Графік вольт-амперної характеристики, що визначається формулою (1.1), наведено на рис. 1.25,а для наступних параметрів: I_L = 100 мА, Is, = 1нА, А = 4 см^2 і Т = 300 К.

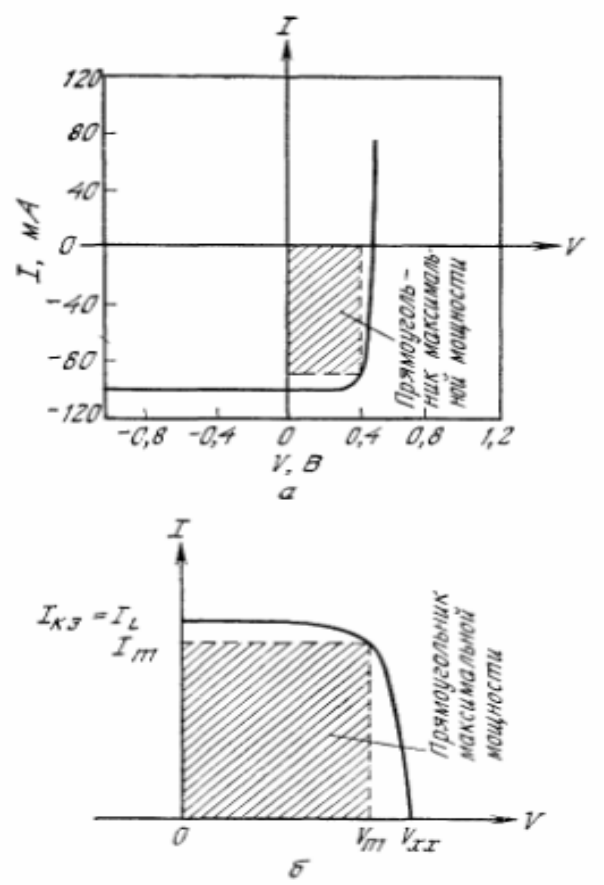


Рисунок 1.25 – Вольт-амперна характеристика освітленого сонячного елемента

Оскільки вольт-амперна характеристика проходить через четвертий квадрант, це означає, що прилад є джерелом енергії. При відповідному підборі навантажувального опору енергія може досягати 80% добутку Ікз на Uхх (Ікз – струм короткого замикання, Uхх – напруга холостого ходу елементів). Частіше вольт-амперну характеристику елемента зображують так, як показано на рис. 1.25,б. На рис. 1.25,б також визначені величини Im і Um – значення струму та напруги, при яких реалізується максимальна вихідна потужність Рм (Рм = Im·Um).

З рівняння (1.1) отримуємо, що напруга холостого ходу (при I=0) дорівнює

$$V_{xx} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I_L}{I_s}+1\right) \approx \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I_L}{I_s}\right). \qquad (1.3)$$

Отже, при заданому струмі I_L напруга холостого ходу логарифмічно зростає при зменшенні струму насичення Is. Вихідна потужність дорівнює

$$P = I \cdot V = I_s V\left(e^{qV/kT} - 1\right) - I_L V. \qquad (1.4)$$

Умову максимуму потужності отримуємо, поклавши dP/dV=0, звідки маємо

$$I_m = I_s \cdot \beta \cdot V_m e^{\beta V_m} \approx I_L\left(1 - \frac{1}{\beta V_m}\right), \qquad (1.5)$$

$$V_m = \frac{1}{\beta}\cdot\ln\left(\frac{I_L/I_s+1}{1+\beta V_m}\right) \approx V_{xx} + \frac{1}{\beta}\cdot\ln\left(1+\beta V_m\right), \qquad (1.6)$$

де $\beta = q/kT$.

Максимальна вихідна потужність визначається виразом

$$P_m = I_m \cdot V_m \approx I_L\left[V_{xx} - \frac{1}{\beta}\cdot\ln\left(1+\beta V_m\right) - \frac{1}{\beta}\right] = I_L\left(E_m / q\right), \qquad (1.7)$$

де

$$E_m = q\left[V_{xx} - \frac{1}{\beta}\cdot\ln\left(1+\beta V_m\right) - \frac{1}{\beta}\right] \qquad (1.8)$$

Величина E_m відповідає тій максимальній енергії, яка виділяється в навантаженні при поглинанні одного фотона і при оптимальному погодженні елемента із зовнішнім ланцюгом.

Для даного напівпровідника густина струму насичення J_s може бути отримана з формули (1.2). Мінімальне значення J_s для Si при 300 К становить $\sim 10^{-15}$ А/см^2. При АМ1,5 щільність струму короткого замикання $J_{кз}$, рівну J_L можна отримати графічно з рис. 1.25:

$$J_{кз} = J_L \cdot (E_g) = q\int_{hV=E_g}^{\infty}\left(dn_{ph} / dh\nu\right)\cdot d(h\nu). \qquad (1.9)$$

Результат такого інтегрування показаний на рис. 1.26 (крива 1) [11].

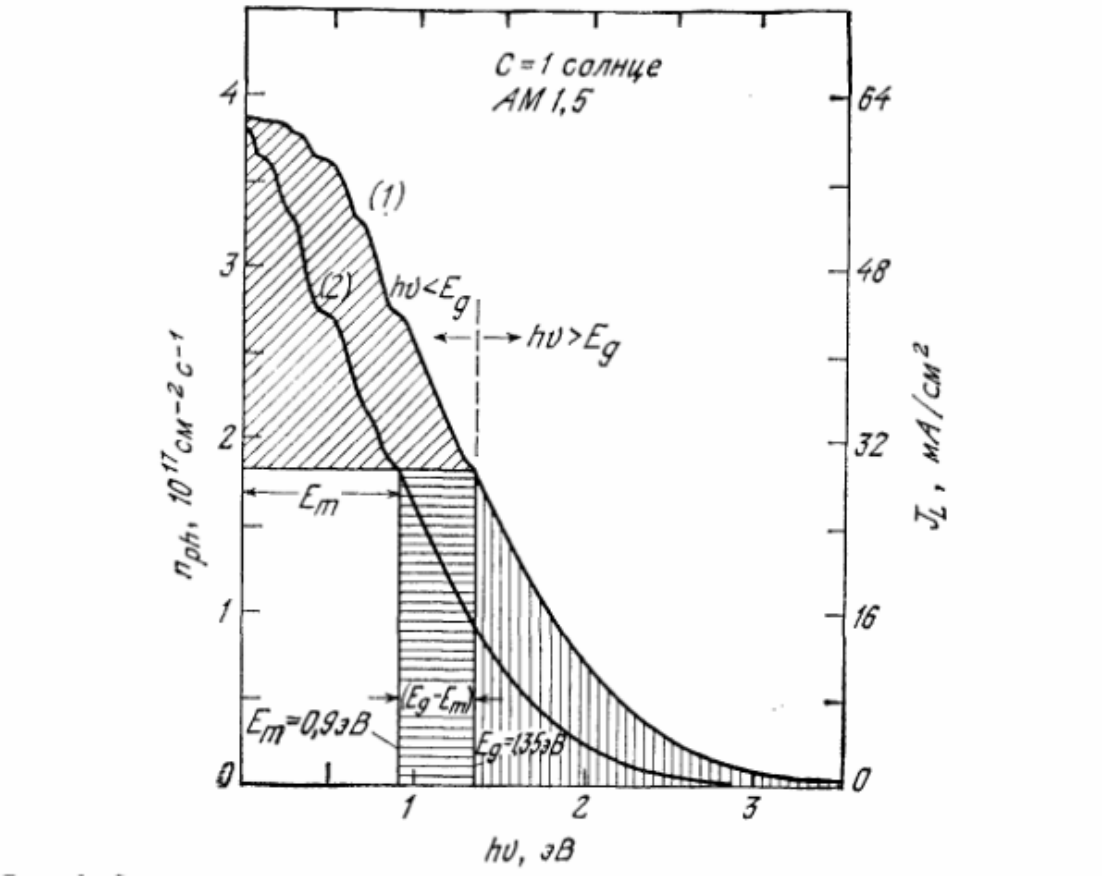


Рисунок 1.26 – Залежність щільності потоку фотонів в сонячному спектрі від енергії фотона та графічний метод визначення ефективності перетворення

Якщо значення J_s і J_L відомі, величину Em можна отримати за допомогою чисельного розв'язку трансцендентних рівнянні (1.3), (1.6) і (1.8). Оскільки величина Em залежить від J_s, вона залежить також від параметрів матеріалу (таких, як τ, D і рівня легування). Ідеальна ефективність перетворення реалізується при оптимальному виборі параметрів матеріалу, коли величина J_s мінімальна. Поведінка Em для напівпровідників з різною шириною забороненої зони показано на рис. 1.26 (крива 2). Ідеальна ефективність перетворення дорівнює відношенню максимальної вихідної потужності до зовнішньої потужності (потужності падаючого випромінювання) P_{in} і може бути визначена графічно з рис. 1.26:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_L\left(E_m / q\right)}{P_{in}} = \left[V_m^2 I_s \left(q / kT\right) e^{qV_m / kT}\right] / P_{in} \qquad (1.10)$$

або

$$\eta = \frac{\text{Прямокутник із сторонами } E_m \text{ і } n_{ph}}{\text{Площа під кривою 1}}, \qquad (1.11)$$

де площа під кривою 1 дорівнює $5{,}2 \cdot 10^{17}$ еВ/(см^2·с).

Максимальна ефективність виявляється рівною 31% і досягається при E_g =1,35 еВ, якщо використовувати параметри матеріалу, характерні для напівпровідників типу $A^{III}B^{V}$.

На рис. 1.14 наведена залежність ідеальної ефективності сонячного елемента при 300 К від ширини забороненої зони [13]. Крива з відміткою С= 1 відповідає АМ1,5. Невеликі коливання на ній пов'язані з характером поглинання випромінювання в атмосфері. Граничне значення ідеальної ефективності можна обчислити на підставі принципу детальної рівноваги або в припущенні, що втрати обумовлені лише випромінювальною рекомбінацією. Ці методи також призводять до результатів, близьким до одержуваних з допомогою графічної побудови і наведеним на рис. 1.27.

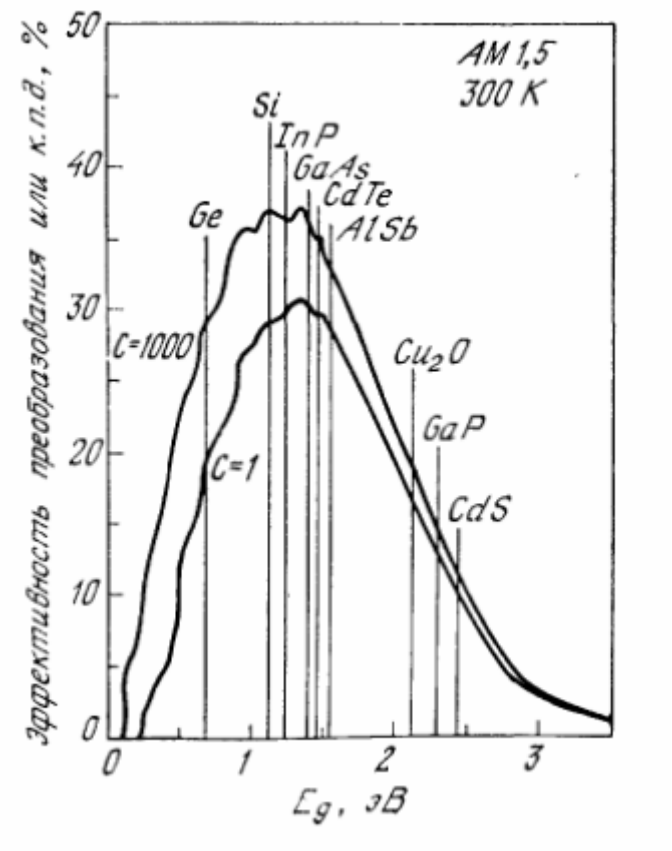


Рисунок 1.27 – Залежність ідеального ККД сонячного елемента від Eg при 1000-кратної концентрації сонячного випромінювання (Т=300К)

Зазначимо, що крива ефективності має широкий максимум, в межах якого ККД слабо залежить від E_g. Тому всі напівпровідники, які мають ширину забороненої зони від 1 до 2 еВ, відносяться до матеріалів, придатних для створення сонячних елементів. Існує ряд факторів, що знижують ідеальну ефективність, внаслідок чого реальні значення ефективності перетворення нижче ідеальних. На рис. 1.27 наведена також крива ідеальної ефективності для випадку оптично сконцентрованого випромінювання інтенсивністю 1000 сонць (тобто 844 кВт/м^2). Максимум ідеальної ефективності перетворення зростає з 31% (при С = 1) до 37% (при С = 1000). Це зростання пов'язане в основному зі збільшенням Uxx, яке призводить до збільшення E_g у відповідності з формулою (1.8). Поведінка щільності струму короткого замикання I_L, ілюструється рис. 1.28.

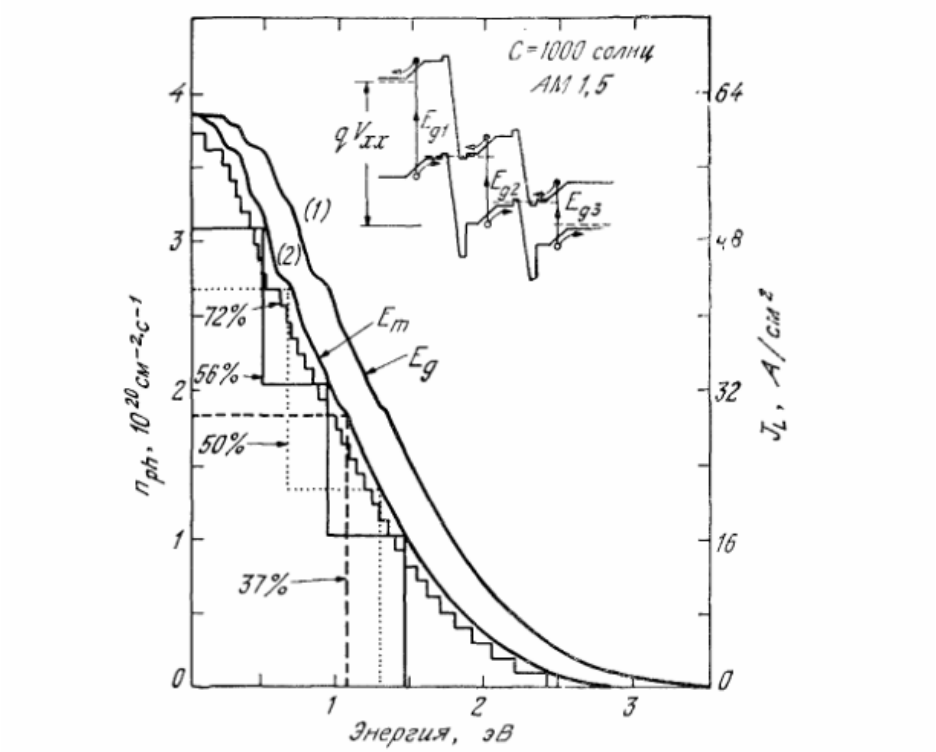


Рисунок 1.28 – Залежність щільності потоку фотонів від їх енергії в спектрі концентрованого сонячного випромінювання та графічний метод визначення ККД в каскадних сонячних елементах з послідовно з'єднаними p-n переходами

На рисунку наведено також зонна діаграма напівпровідникової структури, яку можна використовувати для високоефективного перетворення концентрованого сонячного випромінювання. Для знаходження максимальної ефективності можна використовувати графічний метод, поклавши щільності струму у всіх p-n переходах однаковими. Для двох послідовних p-n переходів максимально можливий ККД досягає 50% і реалізується при E_{g1} = 1,56 еВ і E_{g2} = 0,94 еВ. Для трьох переходів ККД досягає 56% при E_{g1} = 1,75 еВ, E_{g2} = 1,18 еВ і E_{g3} =0,75 еВ. При подальшому збільшенні числа переходів ККД зростає дуже повільно: так, при 36 переходах максимум ККД дорівнює 72%.

1.13.2 Вольт-амперні характеристики

Для реальних сонячних елементів слід змінити ідеальну еквівалентну схему, наведену на рис. 1.11,б, включивши в неї послідовний опір, обумовлений омічним падінням напруги на особовому контакті, і шунтуючий паралельний опір, обумовлений струмами витоку (рис. 1.29, вставка).

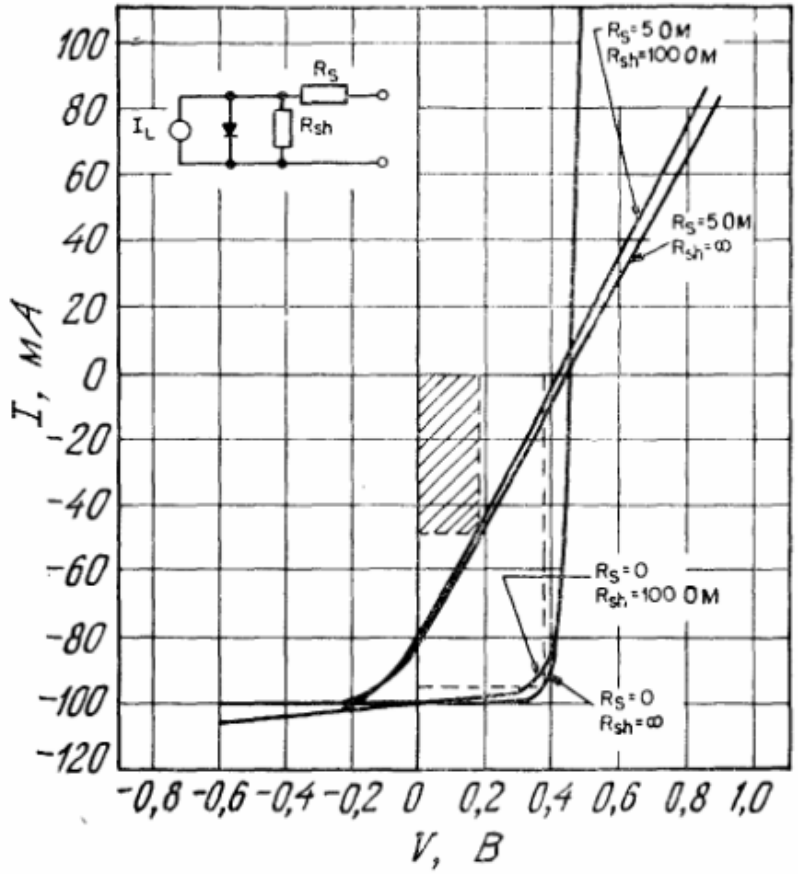


Рисунок 1.29 – Теоретичні вольт-амперні характеристики сонячного елемента при різних значеннях послідовно паралельного опорів. На вставці показано еквівалентна схема. Параметри елемента ті ж, що використовувалися на рис. 1.25

Якщо струм діода визначається формулою (1.1), то вольт-амперна характеристика задовольняє рівнянню:

$$\ln\left(\frac{1+I_L}{I_s}-\frac{V-I\cdot R_s}{I_s R_{sh}}+1\right)=\frac{q}{kT}\left(V-IR_s\right). \qquad (1.12)$$

Рішення цього рівняння при різних комбінаціях параметрів наведено на рис. 1.26. Значення R_s, R_{sh} тут ті ж, що на рис. 1.25. Видно, що шунтуючий опір 100 Ом, не впливає помітно на вихідну потужність приладу, тоді як навіть дуже невеликий послідовний опір 5 Ом знижує вихідну потужність більше ніж на 30% порівняно з оптимальною величиною, що досягає при R_s=0. Тому надалі ми будемо нехтувати впливом R_{sh}. Тоді струм у зовнішньому ланцюзі струм та вихідна потужність визначаються відповідно виразами:

$$I = I_s\left\{\exp\left[\frac{q(V - IR_s)}{kT}\right] - 1\right\} - I_L, \tag{1.13}$$

$$P = |I \cdot V| = I\left[\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I + I_L}{I_s} + 1\right) + I \cdot R_s\right]. \tag{1.14}$$

Відносний максимум вихідної потужності складає 1; 0,77; 0,57; 0,27 і 0,14 при R_s, рівному відповідно 0; I; 2; 5 і 10 Ом. Послідовний опір сонячного елемента залежить від глибини залягання переходу, концентрацій домішок в n - і p - областях і від конструкції лицьового омічного контакту. Для типового кремнієвого сонячного елементу з геометрією, показаної на рис. 1.14, послідовний опір складає ~ 0,7 Ом для елементів з p - базою і ~ 0,4 Ом для елементів з n - базою. Це розходження у величинах опору обумовлено в основному відносно низьким опором підкладок n - типу.

З допомогою рис. 1.25 і 1.26 можна визначити фактор заповнення FF:

$$FF \equiv \frac{I_m V_m}{I_L V_{xx}}. \tag{1.15}$$

Ефективність перетворення (ККД.) елемента дорівнює:

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_L \cdot V_{xx}}{P_{in}}. \qquad (1.16)$$

Для отримання максимального ККД слід максимізувати всі три співмножника в чисельнику в правій частині виразу (1.16). У реальних сонячних елементах прямий струм може визначатися рекомбінацією носіїв у збідненому шарі. При цьому ефективність перетворення нижче, ніж в ідеальному діоді. У разі однорівневих рекомбінаційних центрів рекомбінаційний струм можна записати у вигляді:

$$I_{rec} = I'_s\left[\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - 1\right], \qquad (1.17)$$

$$\frac{I'_s}{A} = \frac{qn_i W}{\sqrt{\tau_p \tau_n}}. \qquad (1.18)$$

І в цьому випадку вираз для ефективності перетворення легко отримати за допомогою простих рівнянь, аналогічних формулами (1.3)…(1.8), в яких величину I_s слід замінити на I'_s, а показник експоненти розділити на 2. Ефективність перетворення в тому випадку, коли прямий струм визначається рекомбінацією в збідненому шарі, виявляється значно менше, ніж в ідеальному діоді, що обумовлено зменшенням як Uxx, так і фактора заповнення FF. В кремнієвих сонячних елементах при 300 К рекомбінаційний струм призводить до зниження ефективності перетворення на 25%.

В сонячних елементах, в яких дифузійний і рекомбінаційний струми порівняні по величині або міститься багато дефектів, експоненціальна залежність прямого струму від зсуву переходу може мати вигляд exp(qV/nkT), де величина n називається фактором ідеальності. Зазвичай ефективність перетворення зменшується зі збільшенням n.

Хоча окремий кремнієвий сонячний елемент площею 2 см^2 має напругу холостого ходу лише 0,5…0,6 В і струм короткого замикання від 30 до 60 мА, послідовно-паралельне з'єднання таких елементів у велику батарею дозволяє підводити до навантаження істотно більші напруги і струми. Еквівалентна схема такої сонячної батареї показана на рис. 1.30 (вставка).

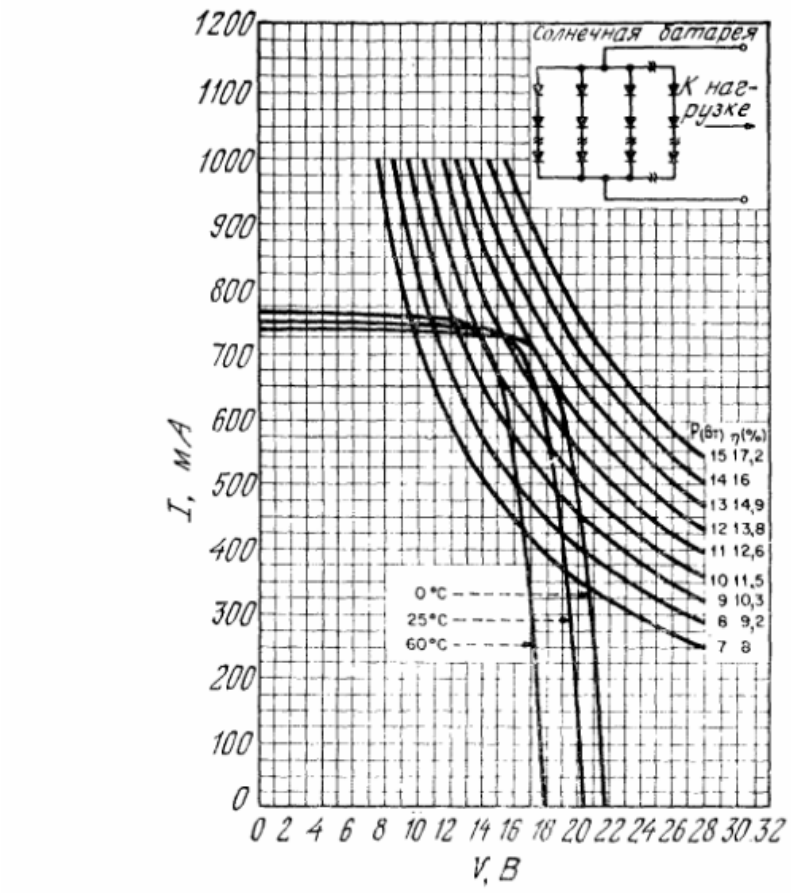


Рисунок 1.30 – Вольт-амперні характеристики сонячної батареї і криві постійної потужності

Ця батарея при температурі 60°С виробляє потужність 10 Вт з ККД = 11,5% при AM1 (~100 мВт/см^2); вольт-амперна характеристика стосується відповідної кривої постійної потужності. Значення Um і Im, які відповідають максимальному виділенню потужності батареєю, дорівнюють 14 В і 720 мА, відповідно. Робота при знижених температурах дозволяє підвищити вихідну потужність і ККД батареї.

1.14 Постановка завдання

Аналіз опублікованих літературних даних по темі магістерської роботи показав, що параметри роботи ФЕП в залежності від умов їх експлуатації висвітлені недостатньо.

Ряд проблем, пов'язаних із застосуванням сонячній енергетиці зосереджується в області не пов'язаної безпосередньо з фотоперетворювачем. Ці проблеми знаходяться в області перетворювальної техніки, вірніше, в області спряження засобів перетворювальної техніки з первинним джерелом енергії – фотоперетворювачів.

В залежності від освітленості фотоелемента, спектрального складу падаючого світла, температури ця характеристика може видозміняться породжуючи сімейство вольт-амперних характеристик фотоперетворювача.

Для дослідження динамічних та вольт-амперних характеристик фотоперетворювача необхідно:

1. Вибрати відповідне програмне забезпечення для реалізації моделі.
2. Промоделювати роботу фотоперетворювача.
3. Розробити стенд для дослідження.
4. Провести дослідження.
5. Порівняти результати отриманих даних.

Тому основним завданням дослідження є розробка лабораторного стенду для дослідження вольт-амперних і динамічних характеристик фотоелектричного перетворювача в залежності від рівня освітленості і спектрального складу світлового потоку.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА

Моделлю називається будь-який інший об'єкт, окремі властивості якого повністю або частково співпадають з властивостями вихідного. Вичерпно повної моделі бути не може, вона завжди обмежена і має лише відповідати цілям моделювання, відображаючи рівно стільки властивостей вихідного об'єкта і в такій повноті, скільки необхідно для конкретного дослідження.

Можна виділити кілька цілей, заради яких створюються моделі [14]:

1. Модель як засіб осмислення допомагає виявити взаємозалежності змінних, характер їх зміни в часі, знайти існуючі закономірності. При складанні моделі стає більш зрозумілою структура досліджуваного об'єкта, розкриваються важливі причинно-наслідкові зв'язки.

У процесі моделювання поступово відбувається розділення властивостей вихідного об'єкта на суттєві і другорядні з точки зору сформульованих вимог до системи. У певному сенсі вся наукова діяльність зводиться до побудови і дослідження моделей;

2. Модель як засіб прогнозування дозволяє передбачати поведінку об'єкта і керувати ним, відчуваючи різні варіанти управління.

3. Модель як засіб проектування, що включає етапи ескізного, технічного і робочого проектування. Досягнення цієї мети стало можливим завдяки інтенсивному розвитку спеціалізованих прикладних пакетів.

Експериментувати з реальним об'єктом часто буває незручно, а іноді й просто небезпечно або взагалі неможливо в силу ряду причин:

– великий тривалості експерименту,

– ризику пошкодити або знищити об'єкт,

– ризику здоров'ю і життю дослідників,

– відсутність реального об'єкта у випадку, коли він ще тільки проектується.

Всі ці причини усуваються при використанні моделей.

Моделі можна умовно розділити на три групи: фізичні, аналогові і математичні.

Математична модель є математичним описом реального фізичного об'єкта. Це опис базується на фізичних законах, що описують поведінку об'єкта. Властивості об'єкта, представленого математичною моделлю, можуть вивчатися з використанням аналітичних і обчислювальних методів.

Комп'ютерна модель – це програмна реалізація математичної моделі, доповнена різними службовими програмами (наприклад, рисують і змінюють графічні образи в часі).

Пакет Simulink є додатком до пакету MATLAB. При моделюванні з використанням Simulink реалізується принцип візуального програмування, згідно з яким, користувач на екрані з бібліотек стандартних блоків створює модель пристрою і здійснює розрахунки. При цьому, на відміну від класичних способів моделювання, користувачеві не потрібно досконально вивчати мову програмування і чисельні методи математики, а досить загальних знань, необхідних при роботі на комп'ютері і, природно, знань тієї предметної області, в якій він працює.

Simulink є досить самостійним інструментом MATLAB і при роботі з ним зовсім не потрібно знати сам MATLAB та інші додатки. З іншої сторони доступ до функцій MATLAB та іншим його інструментів залишається відкритим і їх можна використовувати в Simulink.

При моделюванні можна вибирати метод рішення диференціальних рівнянь, а також спосіб зміни модельного часу (з фіксованим або змінним кроком). В ході моделювання є можливість стежити за процесами, що відбуваються в системі. Для цього використовуються спеціальні пристрої спостереження, що входять до складу бібліотеки Simulink. Результати моделювання можуть бути представлені у вигляді графіків або таблиць.

Структурні моделі будуються на основі математичного опису динамічних систем. Цей опис може бути представлена диференційним

рівнянням, передатною функцією, нулями і полюсами передатної функції, або рівняннями простору станів. В пакеті Simulink є повний набір блоків, що дозволяють реалізувати будь-яку структурну модель.

Представлення результатів моделювання структурних моделей здійснюється при використанні пакета розширення Control System, який у своєму складі має інструментальний засіб LTI-Viewer.

Основою функціональної моделі є логіка роботи пристрою, яке, як правило, містить нелінійні елементи. Функціональні моделі використовуються для моделювання елементів силової електроніки, при дослідженні динаміки систем, поданих структурними моделями. В цьому випадку відпадає необхідність у заміні силового перетворювача еквівалентною аперіодичною ланкою чи ланкою запізнювання.

Віртуальні моделі – це замасковані блоки пристроїв силової електроніки та електромеханіки, поміщені в бібліотеки пакета розширення Sim Power System.

Застосування віртуальних моделей дозволяє дослідити не тільки динамічні характеристики системи, але й її статичні характеристики, такі як:

– регулювальні характеристики;

– навантажувальні характеристики;

– електромагнітні характеристики;

– енергетичні характеристики.

Представлення результатів моделювання функціональних і віртуальних моделей, як правило, здійснюється шляхом запису результатів моделювання в робочий простір Matlab з їх подальшою програмною обробкою.

2.1 Аналіз проблеми та постановка задачі моделювання

Фотоперетворювачі в даний час отримують все більше поширення у світі. Завдяки останнім досягненням в галузі твердотільної електроніки та фотовольтаїки відбувається поступове зниження їх ціни і підвищується надійність.

Однак ряд проблем, пов'язаних із застосуванням сонячній енергетиці зосереджується в області не пов'язаної безпосередньо з фотоперетворювачем. Ці проблеми знаходяться в області перетворювальної техніки, вірніше, в області спряження засобів перетворювальної техніки з первинним джерелом енергії - фотоперетворювачів.

У поширених підходів до аналізу фотогенеруючих систем фотоперетворювач розглядається як джерело струму шунтуємий доданими переходом. Цією схемою заміщення, головним чином, і визначається вид вольт-амперної характеристики фотоперетворювача. Вона являє собою вольт-амперну характеристику прямовключеного діода (перевернута) піднята на величину фотоструму. В залежності від освітленості фотоелемента, спектрального складу падаючого світла, температури ця характеристика може видозміняться породжуючи сімейство вольт-амперних характеристик фотоперетворювача. Таку характеристику зазвичай використовують для побудови математичних моделей пристроїв на базі фотоперетворювача.

Однак, кожна характеристика сімейства має робочу точку максимального відбору потужності. Координати цієї точки, у залежності від перерахованих вище факторів, весь час змінюється. Утримання в оптимальній робочій точці, в сучасних умовах, здійснюється за допомогою напівпровідникового перетворювача (зазвичай - імпульсного перетворювача постійної напруги), включеного в ланцюзі зі зворотним зв'язком по струму або по напрузі.

У цьому випадку фотоелемент знаходиться в контурі пульсуючого струму перетворювача і при моделюванні необхідно враховувати динамічні

властивості фотоперетворювача. Вони зумовлені наявністю у фотоперетворювача ємності. Зазвичай цим параметром, при моделюванні, нехтують, що може призводити до значних похибок при здійсненні розрахунків фотогенеруючих систем.

До теперішнього часу цей аспект роботи фотогенератора було розглянуто мало або взагалі не розглядався.

У зв'язку з цим актуалізується завдання аналізу процесів перетворення електричної енергії в фотоперетворювачі з урахуванням його динамічних властивостей.

Для проведення даного аналізу в роботі була розроблена математична модель.

2.2 Опис моделі

У процесі моделювання проводилося ключування фотоперетворювача з допомогою ідеального ключа з наступною передачею енергії в мережу постійного струму, яка карбувалася в моделі як противоЕРС.

На рисунку 2.1 зображено реалізацію моделі для проведення модельного експерименту в середовищі MATLAB-SimPowerSistem.

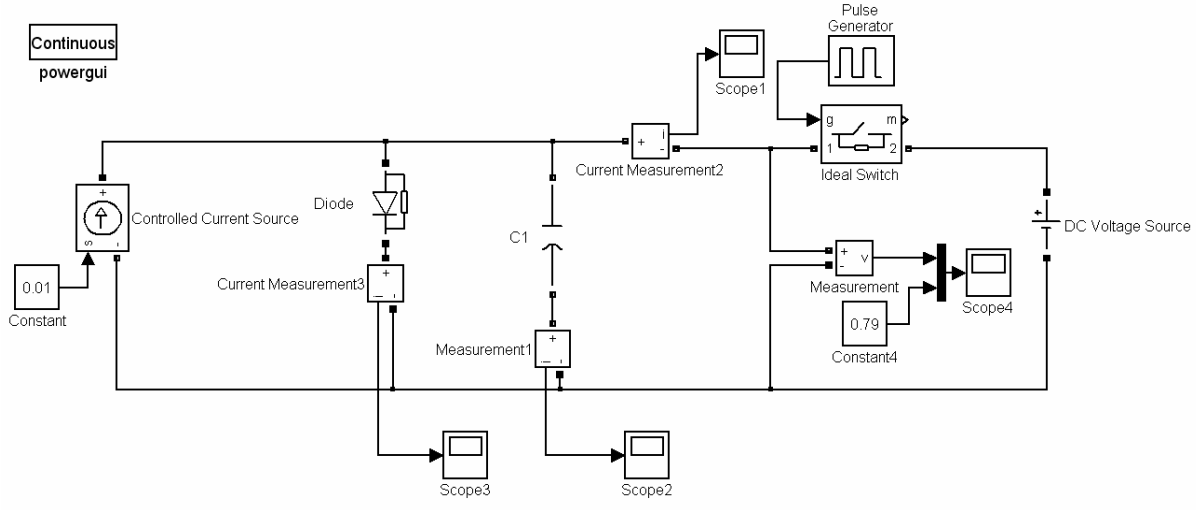


Рисунок 2.1 – Модель для проведення модельного експерименту в середовищі MATLAB-SimPowerSistem

Схема заміщення фотоперетворювача складається з джерела струму, зворотного діоду та ємності. Для відображення струмів крізь діоді та ємність у моделі до відповідних гілок включені датчики струмів та осцилографи *Scope2* та *Scope3*. Для спостереження напруги на фотоперетворювачі паралельно йому встановлено датчик напруги з відповідним віртуальним осцилографом *Scope4*. Для спостереження струму через фотоперетворювач у моделі встановлено датчик струму з осцилографом *Scope1*.

В якості ключового елементу у моделі використано ідеальний ключ з бібліотеки *SimPowerSistem*. Ключовий елемент керується за допомогою генератору прямокутних імпульсів *Pulse Generator* з бібліотеки *Simulink*.

В якості навантаження в моделі використано ідеальне джерело напруги з бібліотеки *SimPowerSistem*.

2.3 Результати моделювання

На рисунку 2.2 зображено струм на виході фотоперетворювача.

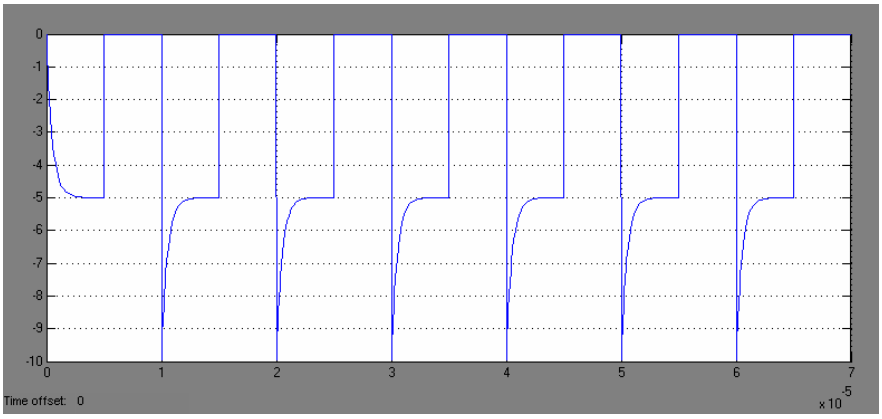


Рисунок 2.2 – Осцилограма струму фотоперетворювача

В даному випадку зображена ситуація коли напруга на вході фотоперетворювача має значення, що перевищує напругу холостого ходу фотоприймача. Ця ситуація виникає при нерівномірному освітленні окремих

сегментів фотобатареї. Тому струм протікає у зворотному напрямку. Але з осцилограми видно, що після вмикання напівпровідникового ключа виникає струм перезаряду ємності. Наявність цього струму є несприятним фактором для напівпровідникового перетворювача та може привести до виходу з ладу силового ключа.

На рисунку 2.3 зображено результати моделювання струму через зворотній діод.

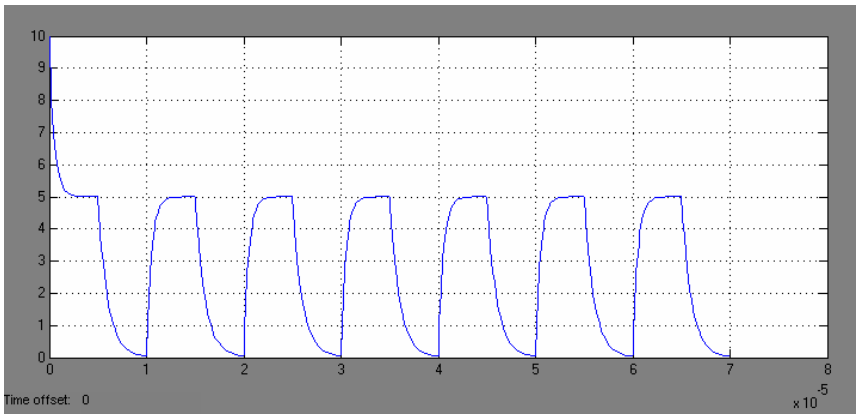


Рисунок 2.3 – Осцилограма струм діоду

З осцилограми видно, що він має найбільші значення при відкритому стані напівпровідникового ключа, а при вимиканні ключа він спадає до нуля. Затримка у збільшення струму виникає внаслідок затримки зміни напруги на ємності. У встановленому режимі струм на виході фотоперетворювача дорівнює струму зворотного діоду. На рисунку 2.3 зображено результати моделювання струму через зворотній діод.

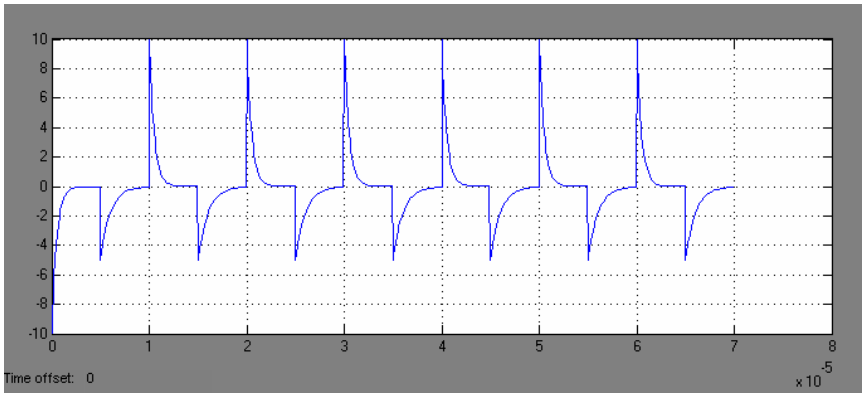


Рисунок 2.4 – Осцилограма струм ємності

З осцилограми видно, що середнє значення струму ємності є нульовим, а площа позитивних та негативних імпульсів є, відповідно, рівними. Але амплітуда заряду ємності значно перевищує амплітуду розряду ємності через зворотний діод.

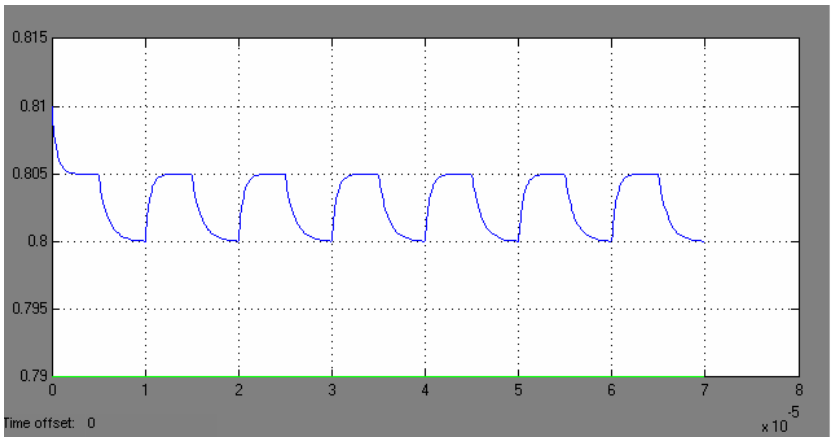


Рисунок 2.5 – Осцилограма струм ємності

Пульсація напруги на виході фотоперетворювача (рисунок 2.5) обумовлена рівнем напруги протиЕРС та напруги холостого ходу фотоперетворювача.

Отже в результаті моделювання були отримані осцилограми струмів і напруг у схемі з яких можна якісно судити про характер реальних перехідних процесів в системі: фотоперетворювач – ІППН – мережа постійного струму.

За результатами моделювання можна зробити висновок про відміну і більш складний характер перехідного процесу в системі. Особливо це стосується форми струму напівпровідникового ключа, а саме наявність значних стрибків під час включення ключа.

3 РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Стенд для досліджень фотоперетворювачів призначений для дослідження таких статичних і динамічних характеристик:

- вольт-амперних характеристик при стабілізованому рівні світлового потоку в залежності від рівня освітленості;

- вольт-амперних характеристик при пульсуючому світловому потоці залежно від рівня освітленості;

- вольт-амперних характеристик при стабілізованому рівні світлового потоку та імпульсного навантаження залежно від рівня освітленості;

- вольт-амперних характеристик при пульсуючому світловому потоці та імпульсного навантаження залежно від рівня освітленості;

- динамічних характеристик струмів і напруг для режимі імпульсних світлових потоків та імпульсних навантажень.

Всі вище перелічені характеристики можуть бути отримані для світлових потоків з різною довжиною хвилі випромінювання. Дана функція забезпечується застосуванням відповідних світлових променів.

3.1 Опис функціональної схеми

Стенд для дослідження фотоперетворювачів (далі - стенд) включає в себе наступні функціональні вузли:

Т - сітьовий трансформатор;

В - випрямляч;

ІППН - імпульсний перетворювач постійної напруги;

РТ - регулятор струму;

ТГ1, ТГ2 - два генератора тактових;

СК - силовий ключ;

СІ - світлодіодний випромінювач;

ФП - фотоперетворювач;

PV1 - вольтметр;

PA1 - амперметр.

Функціональна схема стенду наведена на рисунку 3.1.

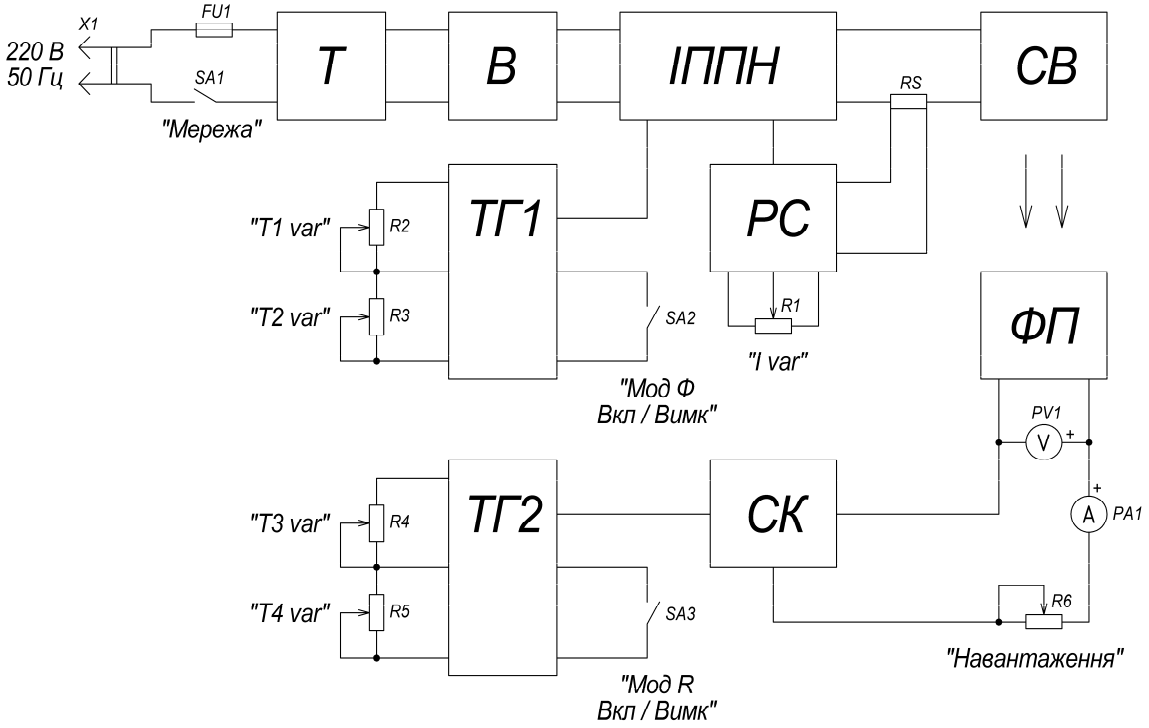


Рисунок 3.1 – Електрична функціональна схема стенду

Стенд живиться від однофазної мережі змінного струму напругою 220 В, частотою 50 Гц. На вході стенду встановлені тумблер SA1 і плавкий запобіжник FU1. Тумблер SA1 призначений для оперативного підключення стенду до живильної мережі. Захист стенду від аварійних режимів забезпечується запобіжник FU1.

Трансформатор Т призначений для гальванічної розв'язки елементів стенду від живильної мережі і перетворення напруги живильної мережі в змінну напругу 24 В Змінна напруга 24 В випрямляється випрямлячем і надходить на вхід ІППН. Навантаженням ІППН є світлодіодний випромінювач СВ. В контурі струму навантаження ІППН встановлений шунт RS, що є датчиком струму. Сигнал, пропорційний величині струму навантаження ІППН надходить на вхід регулятора струму РС. Завдання величини струму навантаження здійснюється змінним резистором R1

(«I var»). Регулятор струму РС, датчик струму RS і ІППН у сукупності представляють собою джерело струму.

Світлодіодний випромінювач призначений для формування світлового потоку, опромінення досліджуваного фотоперетворювача ФП. В залежності від типу застосованих світлодіодів можуть бути виготовлені випромінювачі з різною довжиною хвилі світлового потоку.

Регулювання величини світлового потоку СВ здійснюється шляхом регулювання величини струму СВ (резистор R1).

Тактовий генератор ТГ1 призначений для формування імпульсів керування (включення/вимикання) ІППН (пульсуючий режим роботи). Тривалість включеного стану задається змінним резистором R2 («T1 var»), тривалість паузи (вимкнений стан) – R3 («T2 var»). Блокування роботи ТГ1 здійснюється тумблером SA2 (Мод Ф Вкл/Викл).

Напруга і струм навантаження фотоперетворювача ФП вимірюються за допомогою вольтметра PV1 і амперметра PA1, відповідно. Навантаженням ФП служить змінний резистор R6 («Навантаження»). Підключення навантаження до ФП забезпечується силовим ключем СК. Діапазон вимірювання приладів PV1 і PA1 визначається типом фотоперетворювача.

Тактовий генератор ТГ2 призначений для формування імпульсів керування СК. Тривалість включеного стану задається змінним резистором R4 («T3 var»), тривалість паузи (вимкнений стан) – R5 («T4 var»). Блокування роботи ТГ2 здійснюється тумблером SA3 (Мод R Вкл/Викл).

3.2 Опис електричної принципової схеми

Живлення стенду здійснюється від однофазної мережі змінного струму напругою 220 В, частотою 50 Гц. Електрична принципова схема стенду наведена на рисунку 3.2

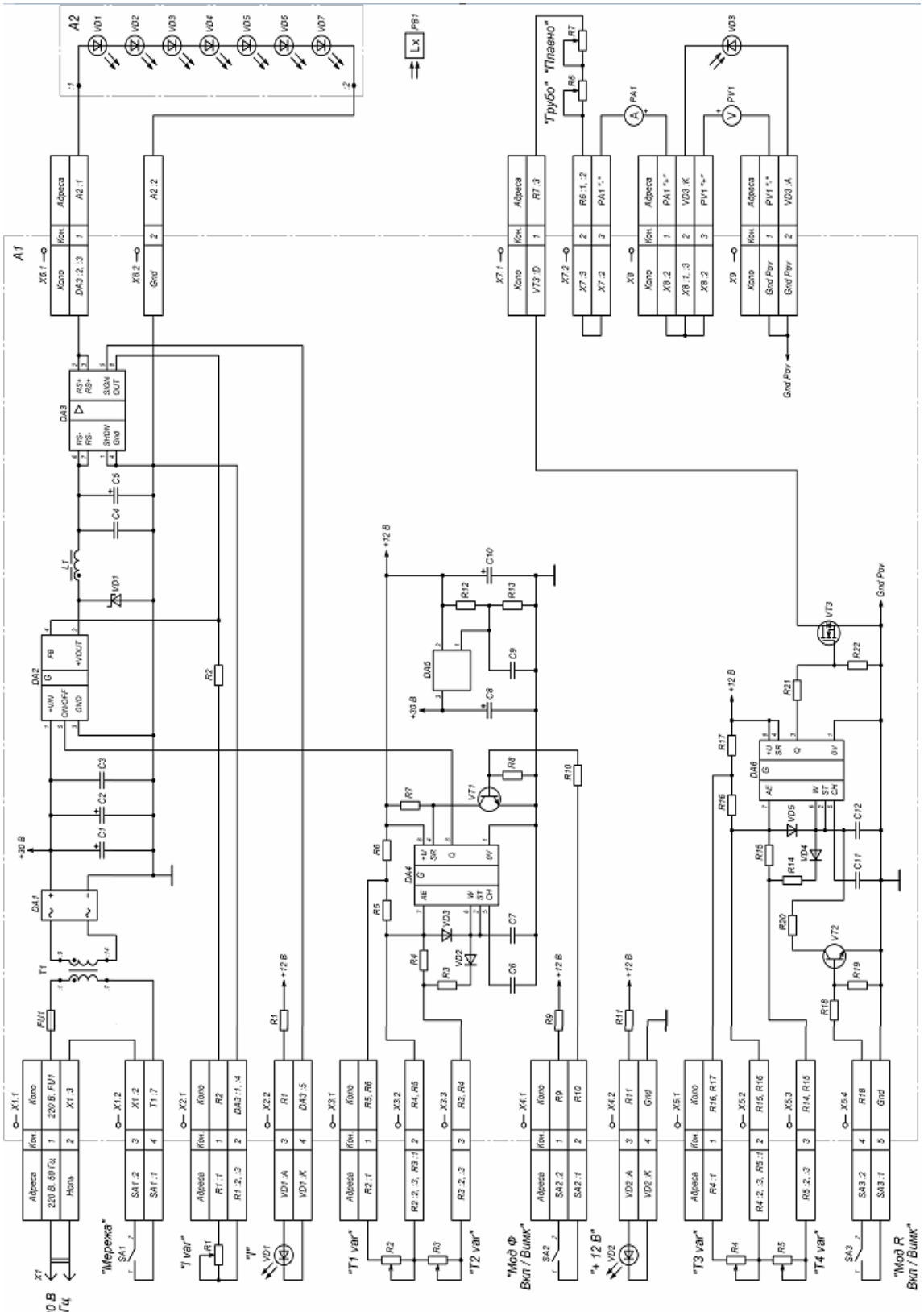


Рисунок 3.2 – Стенд для досліджень. Схема електрична принципова

На вході стенду встановлені тумблер SA1 і плавкий запобіжник FU1. Тумблер SA1 призначений для оперативного підключення стенду до живильної мережі. Захист стенду від аварійних режимів забезпечується запобіжник FU1.

В якості сітьового трансформатора застосований однофазний трансформатор ТН 60/30 G з встановленою потужністю 35 ВА, виробництва ТОВ ПКФ «Тортранс».. Вихідна змінна напруга трансформатора поступає на вхід однофазного мостового випрямляча DA1 (KBL02 DC Components). На виході випрямляча встановлений ємнісний фільтр С1...С3.

Випрямлена постійна напруга надходить на вхід імпульсного перетворювача постійної напруги першого роду (DA2, VD1, L1, C4, C5), виконаного на базі інтегральної мікросхеми LM2596-ADJ, виробництва Texas Instruments. В якості датчика струму навантаження і регулятора струму (RS і РС див. рисунок 3.1) застосовано струмовий сенсор MAX471EPA, виробництва MAXIM, що забезпечує можливість масштабування вихідного сигналу, в досить широкому діапазоні, шляхом зміни опору масштабуючого резистора, що складається з постійного резистора R2 і змінного резистора R1 «I var» (DA3, R2, R1 «I var»). ІППН, спільно з датчиком струму утворюють джерело стабільного струму.

Живлення світлодіодного випромінювача А2, що складається з світлодіодів VD1...VD7 здійснюється від джерела струму, описаного вище. Можливість завдання і стабілізації струму світлодіодів дозволяє регулювати потужність світлового потоку випромінювача.

Тактовий генератор ТГ1 (DA4, VD2, VD3, C6, C7, R3...R10, VT1, R2 («T1 var»), R3 («T2 var»), SA2 («Мод Ф Вкл/Викл») виконаний на базі інтегрального таймера КР1006ВИ1 БК0.348.685 ТУ.

Тривалість імпульсів керування задається параметрами ланцюга R5, R6, VD3, C7, R2 («T1 var»). Тривалість пауз – параметрами ланцюга R3, R4, VD2, C7 і R3 («T2 var»).

Управління включенням/виключенням ТГ1 здійснюється транзисторним ключем R7...R10, VT1 шляхом подачі або зняття напруги зміщення бази транзистора за допомогою тумблера SA2 («Мод Ф Вкл/Викл»). Конденсатор С6 підключений згідно типової схеми включення DA4.

Тактовий генератор ТГ2 (DA6, VD4, VD5, C11, C12, R14...R20, VT2, R4 («Т3 var»), R5 («Т4 var»), SA3 («Мод R Вкл/Викл») так само виконаний на базі інтегрального таймера КР1006ВИ1.

Тривалість імпульсів керування задається параметрами ланцюга R16, R17, VD5, C12, R3 («Т3 var»). Тривалість пауз - параметрами ланцюга R14, R15, VD4, C12 і R4 («Т4 var»).

Управління включенням/виключенням ТГ1 здійснюється транзисторним ключем R18...R20, VT2 шляхом подачі або зняття напруги зміщення бази транзистора за допомогою тумблера SA3 («Мод R Вкл/Викл»). Конденсатор С11 підключений згідно типової схеми включення DA6.

Силовий ключ складається з MOSFET транзистори IRF510, виробництва International Rectifier і резистор R21, R22.

Стабілізовану напругу живлення власних потреб стенду здійснюється від аналогового стабілізатора DA5, C8...C10, R12, R13, виконаного на базі інтегральної мікросхеми КР142ЕН12А бКО.348 834-07 ТУ.

Індикація наявності напруги живлення та наявності струму живлення світлодіодного випромінювача здійснюється з допомогою світлодіодів VD1, VD2 «+12В» і резисторів R1, R11, відповідно.

Навантаженням фотоперетворювача VD3 служать змінні резистори R6 «Грубо» і R7 «Плавно».

В якості вимірювальних приладів PB1, PV1, PA1 можуть бути використані вольтметр, амперметр і люксметр з діапазонами вимірювання, відповідними параметрами досліджуваного елемента або електронні мультиметри.

3.3 Розрахунок функціональних вузлів стенду

3.3.1 Розрахунок елементів тактового генератора ТГ1

Тактовий генератор ТГ1 призначений для формування імпульсів керування (включення/вимикання) ІППН (пульсуючий режим роботи). Тактовий генератор являє собою генератор імпульсів управління (ДІУ), виконаний на мікросхемі КР1006ВИ1 (DA4). Як DA4, крім КР1006ВИ1, можуть бути використані її аналоги: ICM7555, NE/SA/SE555/SE555C виробництва Philips Semiconductors, LM555 виробництва National Semiconductor Corporation, TS555 виробництва ST з наступними технічними параметрами:

діапазон напруг живлення, U_{CC}, В	4,5…16,0
максимальна напруга живлення, $U_{CC\ max}$, В	18,0
максимальний струм споживання, $I_{CC\ max}$, мА	15,0
вихідний струм (струм навантаження), I_{OUT}, мА	100,0
вихідна напруга високого рівня, при I_{OUT} = 100 мА, $U_{1\ OUT}$, В	U_{CC} - 2,0
вихідна напруга низького рівня, при I_{OUT} = -100 мА, $U_{0\ OUT}$, В	2,0
струм управління по входу RESET, при U_{RESET} = 0.4 В, I_{40}, мА	- 0,4
струм управління по входу RESET, при U_{RESET} = U_{CC}, I_{41}, мкА	2,0
діапазон робочих температур, °С	0…70
максимальна потужність, що розсіюється корпусом, P_D, мВт	600
тип корпусу	DIP-8

Управління включенням/виключенням генератора імпульсів управління (DA4, VD2, VD3, R3...R10, C6, C7, R2 T1 var», R3 «T1 var»), здійснюється транзисторним ключем VT1, R7...R10 відповідно положенням тумблер SA2. Електрична принципова схема ТГ1 приведена на рисунку 3.3.

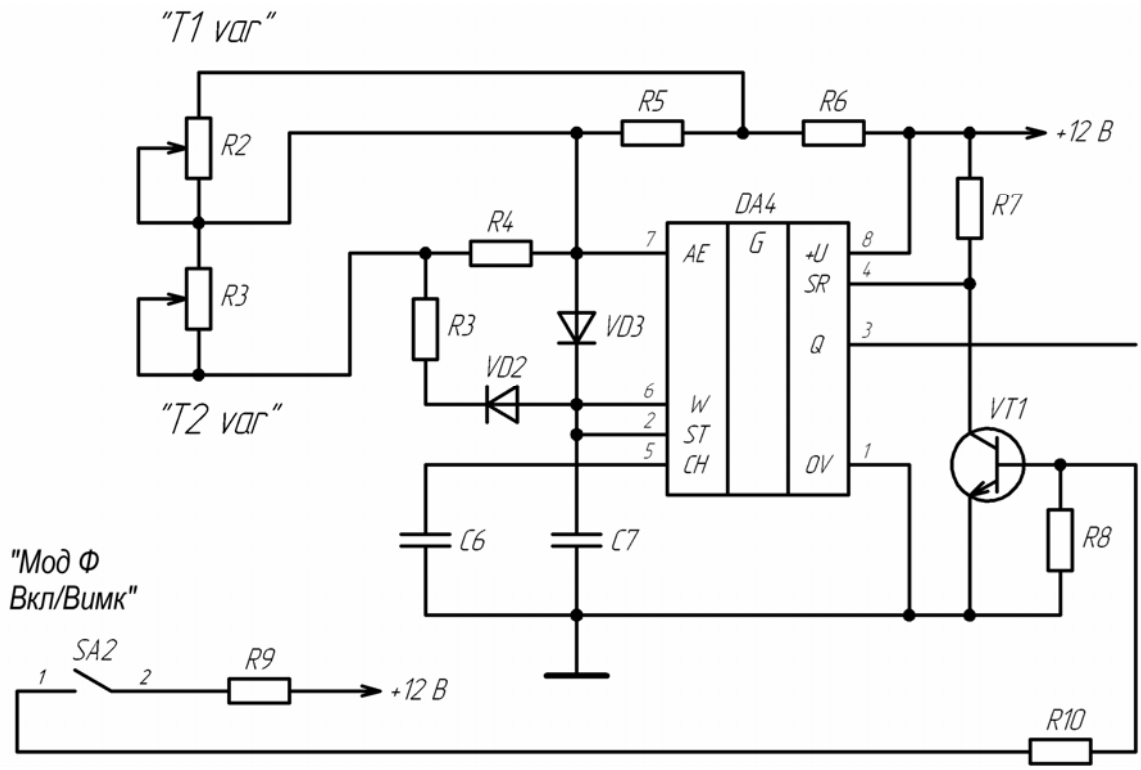


Рисунок 3.3 – Тактовий генератор ТГ1

Напруга живлення власних потреб стенду, відповідно до електричної принципової схеми, одно $U_{СН}$ = 12 В. З метою скорочення обсягу розрахунків, для електричних кіл, що живляться напругою $U_{СН}$ = 12 В, визначимо максимальне значення робочого струму резисторів R-1206 виходячи з їх потужності розсіювання P_{1206} = 0,25 Вт.

$$I_R = \frac{P_{1206}}{U_{СН}} = \frac{0{,}25}{12} = 0{,}0208\ A \qquad (3.1)$$

У відповідності з результатом розрахунку (3.1), з метою уніфікації типів елементів, в ланцюгах, що живляться від джерела напруги $U_{СУ}$ = 12 В при струмі ланцюга I ≤ 0,0208 А в якості резисторів обираємо резистори типу R-1206 muRata.

Згідно з експериментальними даними, для наведеної на рисунку 3.3 схеми включення мікросхеми КР1006ВИ1 або її аналогів, тривалість

вихідного імпульсу t_i і паузи між імпульсами $t_п$ ($U_{упр\ VT1}$ вивід 3 DA4), відповідно дорівнюють:

$$t_u = 0{,}88 \cdot \left(R6 + R5.1\ \right) \cdot C7 \tag{3.2}$$

$$t_n = 0{,}82 \cdot \left(R3 + R4.1\right) \cdot C7 \tag{3.3}$$

Резистор R5.1 являє собою паралельне з'єднання резистора R5 і резистора R2 T1 var».

Резистор R4.1 являє собою паралельне з'єднання резистора R4 і резистора R3 «T2 var»

Згідно з експериментальними даними оптимальна робоча частота проходження імпульсів $f_Р$ = 1,0 кГц при тривалості імпульсу управління t_i = 0,5 мс і коефіцієнті заповнення γ =0,5.

Задаючись значеннями мінімальної і максимальної тривалості імпульсу управління $t_{i\ min}$ = 50 мкс і $t_{i\ max}$ = 500 мкс, відповідно і значенням ємності конденсатора С7 – $0{,}01 \times 10^{-6}$ Ф визначимо сумарне максимальне і мінімальне значення опорів резисторів R6 і R5.1 для обох тривалостей.

$$\left(R6 + R5.1\right)_{\max} = \frac{t_{u\max}}{0{,}88 \cdot C7} = \frac{500 \cdot 10^{-6}}{0{,}88 \cdot 0{,}01 \cdot 10^{-6}} = 56818\ Ом \tag{3.4}$$

$$\left(R6 + R5.1\right)_{\min} = \frac{t_{u\min}}{0{,}88 \cdot C7} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{0{,}88 \cdot 0{,}01 \cdot 10^{-6}} = 5618{,}8\ Ом \tag{3.5}$$

В якості резисторів R6 і R5.1 вибираємо змінний резистор 3321 62,0 кОм ± 10% і плівковий резистор R-1206 5,6 кОм ±1% muRata.

Як конденсатор С7 вибираємо керамічний конденсатор R15 X7R 103 ±10% 50 H 5 muRata (К10-17Б 50В 10 нФ ±10%).

Задаючись значеннями мінімальної і максимальної тривалості паузи між імпульсами управління $t_{п\ min}$ = 50 мкс і $t_{п\ max}$ = 500 мкс, відповідно і значенням ємності конденсатора С7 визначимо сумарне максимальне і мінімальне значення опорів резисторів R3 і R4.1 для обох тривалостей.

$$(R3 + R4.1)_{\max} = \frac{t_{n\max}}{0{,}82 \cdot C7} = \frac{500 \cdot 10^{-6}}{0{,}82 \cdot 0{,}01 \cdot 10^{-6}} = 60975{,}6\ Ом \qquad (3.6)$$

$$(R3 + R4.1)_{\min} = \frac{t_{n\min}}{0{,}82 \cdot C7} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{0{,}82 \cdot 0{,}01 \cdot 10^{-6}} = 6097{,}6\ Ом \qquad (3.7)$$

В якості резисторів R3 і R4.1 вибираємо змінний резистор 3321 62,0 кОм ± 10% і плівковий резистор R-1206 5,6 кОм ±1% muRata.

В якості резисторів R4 і R5 вибираємо резистори R-1206 1,0 МОм ±1% muRata. Резистори такого великого опору не зроблять істотного впливу на параметри змінних резисторів R2 T1 var» і R3 «T2 var», але, при обриві ланцюга цих резисторів, забезпечать працездатність тактового генератора ТГ1.

Як конденсатор С6, згідно з рекомендаціями підприємств виробників, вибираємо керамічний конденсатор R15 X7R 104 ±10% 50 H 5 muRata (К10-17Б 50В 0,1 мкФ ±10%).

В якості діодів VD2 і VD3 вибираємо високочастотні діоди DL4148 MIC з наступними параметрами:

максимальна зворотна напруга, U_b, В	100
максимальний випрямлений струм, I_a, А	0,15
час відновлення, t_b, нс	4
тип корпусу	DL-35

В якості транзистора VT1 транзисторного ключа вибираємо транзистор BC848A Vishay Semiconductor з наступними параметрами:

струм колектора, I_K, А	0,1

напруга колектор – емітер в закритому стані, $U_{КЭ}$,В 30
напруга колектор – емітер в насиченому стані, $U_{КЭ\ нас}$,В 0,4
напруга база – емітер при $I_К$ = 10,0 мА, $U_{БЭ}$,В 0,7
коефіцієнт посилення, $h_{21Э}$ 220
структура n-p-n
тип корпусу SOT-23

Для забезпечення навантаження транзистора VT1 транзисторного ключа, відповідно до його вольт-амперної характеристики, робочий струм колектора повинен бути не менше $I_{Кр}$ = 1,0 мА.

Для цього опір резистора R7 повинно бути не більше

$$R7 = \frac{U_{СН} - U_{КЭ\ нас}}{I_{Кр}} = \frac{12 - 0{,}4}{1{,}0 \cdot 10^{-3}} = 11600\ Ом \qquad (3.8)$$

В якості резистора R7 вибираємо плівковий резистор R-1206 10 кОм ±1% muRata.

Вхідний струм виводу RESET (4) мікросхеми DA4, при URESET = U_{CC} не більше I_{41} = 2,0 мкА.

Падіння напруги на резисторі R7 при струмі I_{41} = 2,0 мкА:

$$U_{R7} = R7 \cdot I_{41} = 10 \cdot 10^{3} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-6} = 0.02\ B \qquad (3.9)$$

Струм колектора і струм бази VT1, відповідно дорівнюють:

$$I_К = I_{40} + I_{R7} = I_{40} + \frac{U_{СН} - U_{КЭ\ нас}}{R7} = 0{,}4 \cdot 10^{-3} + \frac{12 - 0{,}4}{10 \cdot 10^{3}} = 1{,}56 \cdot 10^{-3}\ A \qquad (3.10)$$

$$I_Б = \frac{I_К}{h_{21Э}} = \frac{1{,}56 \cdot 10^{-3}}{220} = 7{,}1 \cdot 10^{-6}\ A \qquad (3.11)$$

Розраховане значення струму бази мізерно мало і порівняно з струмами витоку по поверхні друкованої плати. Приймаємо значення струму бази $I_{Б1} = 0{,}7 \times 10^{-3}$ А

В якості шунтуючого резистора R8 вибираємо резистор R-1206 1,0 кОм ±1% muRata.

Струм резистора R8 становить:

$$I_{R8} = \frac{U_{БЭ}}{R8} = \frac{0,7}{1000} = 0,7\ мА \qquad (3.12)$$

Сумарний опір резисторів R9 і R10:

$$R9 + R10 = \frac{U_{СН} - U_{БЭ}}{I_{R8} + I_{Б1}} = \frac{12 - 0,7}{0,7 \cdot 10^{-3} + 0,7 \cdot 10^{-3}} = 8071,4\ Ом \qquad (3.13)$$

Транзистор VT1 працює в режимі глибокого насичення, тому, як R9 і R10, вибираємо резистори R-1206 4,3 кОм ±1% muRata.

Струм, споживаний елементами ТК1

$$I_{ТК1} = I_K + I_{R11} + I_{Б1} = 1,45 \cdot 10^{-3} + 0,7 \cdot 10^{-3} + 0,7 \cdot 10^{-3} = 2,85 \cdot 10^{-3}\ A \qquad (3.14)$$

3.3.2 Розрахунок елементів індикації

Як світлодіодів VD1, VD2 вибираємо світлодіоди з безбарвною світлорозсіючою колбою зеленого, синього і червоного кольору світіння ARL-5613PGW і ARL-5613URW виробництва Arlight, відповідно. Технічні параметри світлодіодів наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні параметри світлодіодів

Позначення	ARL-5613PGW	ARL-5613URW
Пряме падіння напруги, U_a, В	3,0…3,5	1,8…2,2
Максимальна постійна зворотна напруга, U_b, В	5	5
Номінальний прямий струм, I_a, мА	20	20
Тілесний кут випромінювання, Q, градус	180	180
Сила світла, кд, не менше	1,0	2,0
Колір світіння	зелений	червоний
Тип корпусу	5613	5613

$$R = \frac{U_{СН} - U_{VD}}{I_{VD}} \qquad (3.15)$$

$$R1 = \frac{12 - 3{,}0}{0{,}015} = 600\ Ом$$

$$R11 = \frac{12 - 2{,}0}{0{,}015} = 666{,}6\ Ом$$

В якості резисторів, відповідно до ряду Е24, вибираємо резистори опором 620 Ом і 680 Ом.

Потужності, які виділяються на резисторах R1 і R11 - P_{R1}, і P_{R11}, відповідно дорівнюють:

$$P_R = \frac{(U_{CH} - U_{VD})^2}{R} \qquad (3.16)$$

$$P_{R1} = \frac{(12 - 3)^2}{620} = 0{,}131\ Вт$$

$$P_{R11} = \frac{(12 - 2)^2}{680} = 0{,}147\ Вт$$

Вибираємо R1 = 6200 Ом, R11 = 680 Ом типу R-1206 muRata точністю ±1%.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВАХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА

Для дослідження вольт-амперної характеристики фотоперетворювача був зібраний лабораторний стенд. Спрощена електрична принципова схема стенду наведена на рисунку 4.1.

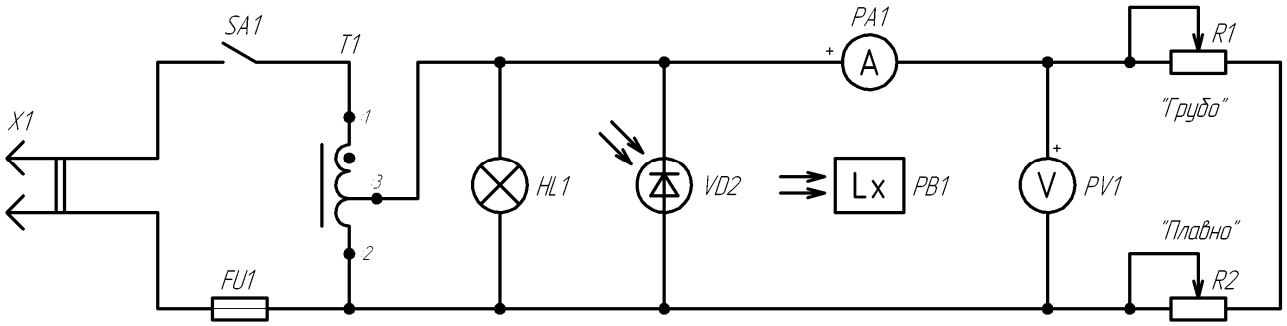


Рисунок 4.1 – Спрощена схема стенду для дослідження вольт-амперних характеристик фотоперетворювачів

Стенд включає в себе:

X1 - сітьову вилку з шнуром;

SA1 - тумблер;

FU1 - запобіжник;

T1 - лабораторний автотрансформатор;

HL1 - лампу розжарювання;

VD2 - фотоперетворювач;

PB1 - люксметр;

PV1 - вольтметр;

PA1 - амперметр;

R1, R2 - два змінних навантажувальних резистора.

Тумблер SA1 призначений для оперативного включення стенду. Захист елементів схеми стенду забезпечується запобіжник FU1.

Як лампи розжарювання була використана лампа розжарювання потужністю 75 Вт з колбою, що розсіює світло. Регулювання світлового

потоку (яскравості лампи) здійснювалося за допомогою лабораторного автотрансформатора типу Латр-2М 2А.

В якості вимірювальних приладів були використані:

- люксметр ВТ4685076 - РВ1;

- тестер Ц4317 - РА1;

- мультиметр DT3350 - PV1.

В якості змінних резисторів R1 і R2 були застосовані резистори серії ППБ-15 опором 10 кОм і 1,0 кОм, відповідно.

Як фотоперетворювач був використаний сонячний елемент на основі мультікристалічного кремнію площею 12 $см^2$ (2 см ×6 см). Зняття вольт-амперної характеристики проводилося шляхом вимірювання напруги фотоперетворювача в залежності від струму навантаження для різних рівнів освітленості його фронтальної поверхні. Струм навантаження задавалося шляхом зміни опору резисторів R1 і R2. Результати вимірювань наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювань

Освітленість, Е = 2500 лк											
U, mB	110	152	200	252	300	349	399	427	450	485	516
I, mA	35	34,5	33,9	32,5	29,5	25	18,5	14,5	11	5,25	0,1
Освітленість, Е = 2000 лк											
U, mB	100	149	200	255	303	350	399	425	450	480	511
I, mA	29,5	29,4	29	27,5	25,3	22	16,7	13,25	9,75	5,1	0,1
Освітленість, Е = 1500 лк											
U, mB	77	154	200	252	301	349	400	424	450	469	503
I, mA	22,6	22,5	22,4	21,5	20,4	18	13,6	11	7,6	5	0,1
Освітленість,, Е = 1000 лк											
U, mB	50	150	200	250	300	350	400	425	450	489	
I, mA	15,4	15,3	15	14,7	14	12,5	9,5	7,4	4,9	0,1	
Освітленість, Е = 500 лк											
U, mB	18	51	100	153	199	250	300	360	445		
I, mA	5,7	5,6	5,6	5,5	5,4	5,25	4,9	4	0,1		

На підставі одержаних результатів побудовано вольт-амперні характеристики сонячного елементу на основі мультікристалічного кремнію, наведена на рисунку 4.2.

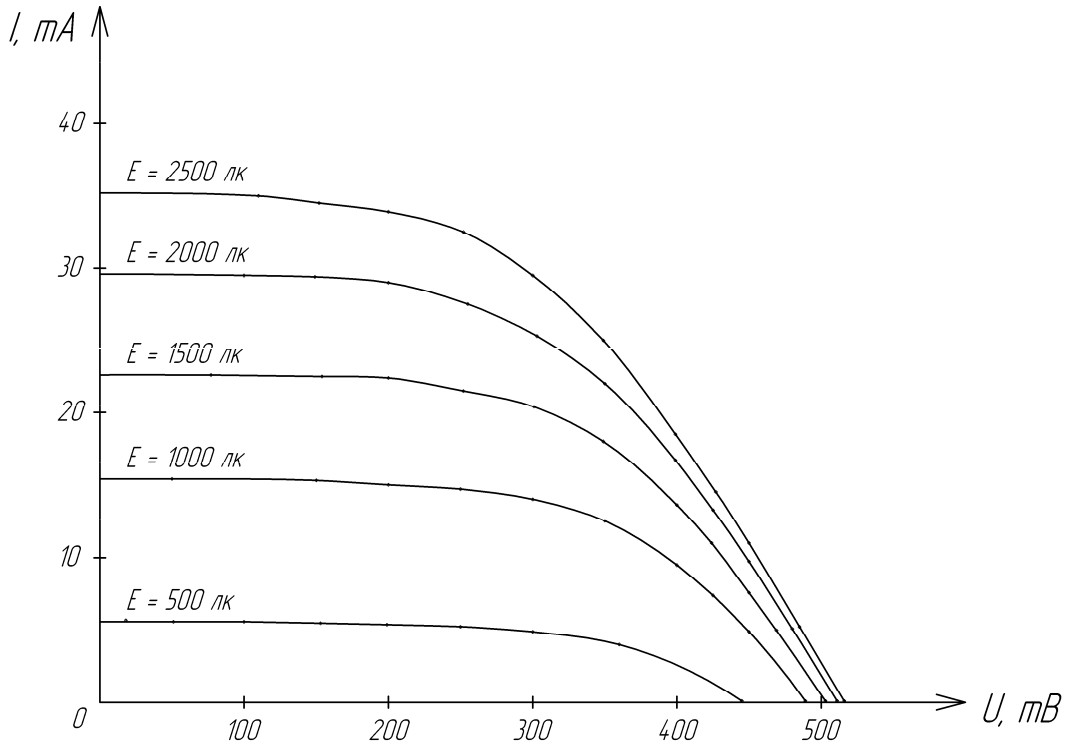


Рисунок 4.2 – Вольт-амперні характеристики сонячного елементу на основі мультікристалічного кремнію

Характеристики відповідають теоретичним.

4.1 Охорона праці при виготовленні лабораторного стенда та проведення досліджень

В лабораторії з параметрами: довжина 5 м; ширина 9 м; висота 3,5м, організовано робоче місце: спеціально обладнаний робочий стіл з контрольно-вимірювальною апаратурою і налагоджуваним устаткуванням.

Робочі місця, на яких виконується паяння і лудіння з використанням електроінструменту, обладнані електрощитом з гніздами для підключення

електроінструменту і підставкою для паяльника з лотком, що запобігає попаданню припою, флюсу і нагару на поверхню столу, а також тарою для зберігання комплектуючих виробів і матеріалів.

Електроінструмент та вимірювальна техніка живляться від електромережі змінного струму напругою 220 В, 50Гц.

При роботі в лабораторії можлива поразка електричним струмом. Основні причини поразки електричним струмом наступні: дотик до неізольованих струмоведучих частин: до металевих частин устаткування, що виявилися під напругою унаслідок пошкодження ізоляції. Міра дії електроструму на організм людини залежить від його величини та протяжності дії. Порогові значення струмів, що проходять через людину представлені в таблиці 4.2 [15]

Таблиця 4.2 – Порогові значення струмів, що проходять через людину

Род струму	Відчутний струм не більше 10 хв., мА	Струм, що не відпускає не більше 3 сек., мА	Смертельний (фібриляційний)
Змінний (50Гц)	0,6...15	4...10	80...100

Шкідливі речовини при проведенні складально-монтажних робіт та їх граничні концентрації представлені в таблиці 4.3 [16].

Таблиця 4.3 – Гранично допустимі концентрації в повітрі робочої зони

Найменування речовини	ГДК мг/м^3	Найменування речовини	ГДК мг/м^3
Гази і пари:		Сірчана кислота	1
Ацетон	200	Кислота соляна	5
Бензин	300	Окисел алюмінію	2
Етиловий спирт	1000	Окисел цинку	5
Окисел вуглецю	20	Свинець і його з'єднання	0,01

При виробництві друкованої плати найбільш небезпечними, щодо охорони праці і техніки безпеки, є наступні технологічні операції: паяння і

збірка готового виробу. Виготовлення багатошарової друкованої плати пов'язано з механічною обробкою шаруватих пластиків.

Хімічне очищення плат проводиться етиловим спиртом – токсичною речовиною (клас небезпеки 4), що діє несприятливо на нервову систему людини, і притупляє свідомість. Також спирт є легкозаймистою рідиною, тобто потенційним джерелом пожежі. Температура спалаху 13^{o}С. Межі займання (у об'ємної частки в суміші): НПВ = 3,6%, ВПВ = 19%.

Шкідливі при паянні олово-свинцевими припоями є пари свинцю, які змінюють склад крові, вражають внутрішні органи і центральну нервову систему. Щоб уникнути розвитку хронічного отруєння свинцем слід виконувати вимоги [16].

Категорія робіт по ступені тяжкості [17] 1а – легкі, роботи виконуються сидячи і супроводжуються незначною фізичною напругою. Категорія напруженості праці – помірно напружена. Іонізуючих випромінювань в лабораторії нема.

Для підтримки необхідних мікрокліматичних умов в лабораторії застосовується місцевий кондиціонер типа «Нептун-18», виконаний в шафового горизонтального виконання і встановлений усередині приміщення, продуктивністю по повітрю – 600м/год, виробництвом холоду – 1800ккал/ч, змінна напруга живленої мережі – 220В застосовується для охолоджування, вентиляції і нагріву повітря [18].

Всі електроприлади в лабораторії відносяться до 1-го класу: мають робочу ізоляцію і елементи для заземлення. Електроустаткування – паяльники, осцилографи, світильники місцевого освітлення, генератор тестових сигналів, ПЕОМ, пускова апаратура. Споживана напруга вказаних електроустановок до 1000 В [19].

Для захисту від поразки електричним струмом пропонується виконувати наступні заходи:

1) При ручному паянні і випаленні ізоляції паяльник повинен

працювати від електромережі під напругою не вище 36 В;

2) Використовувати ізоляцію струмонесучих дротів;

3) Застосовувати приховану електропроводку в трубах, що захищають від механічних пошкоджень;

4) Передбачити аварійний рубильник виключення всього електроживлення в приміщенні;

5) Використати пристрій захисного відключення (УЗО).

4.2 Розрахунок заземлення будівлі

Захисне заземлення будівлі, де розташована лабораторія, знаходиться в одношаровому ґрунті, Опір природного заземлювача складає R_e = 10 Ом [19], допустимий опір заземлювача $R_д$ = 4 Ом [19], питомий опір ґрунту ρ = 87 Ом·м [8]. Коефіцієнт сезонності ψ = 1,3 [19]. Глибина залягання електроду h = 0,5 м.

Контур заземлення виконаний із сталевих стержнів. У траншеї завглибшки до 0,7 м вертикально забиті стержні, а виступаючі з землі верхні кінці з'єднані зваркою в нахліст сталевим прутком.

Як вертикальні електроди використані прутки діаметром d = 0,02 м і завдовжки l = 3,5 м (рисунок 4.3).

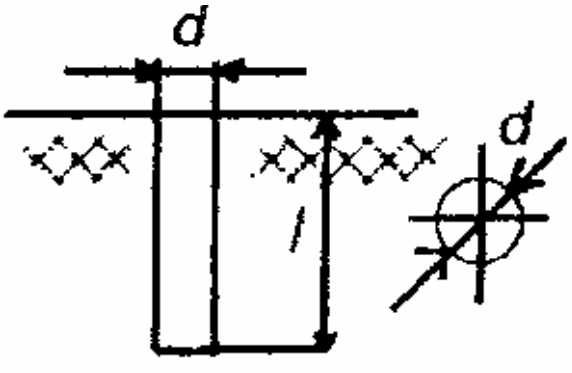


Рисунок 4.3 – Стержньовий заземлювач у поверхні ґрунту l>>d

Знаходимо допустимий опір штучного заземлювача:

$$R_{и} = \frac{R_{е} \cdot R_{д}}{R_{е} - R_{д}} = \frac{10 \cdot 4}{10 - 4} = 6{,}67 \text{ Ом} \qquad (4.1)$$

Відстань від поверхні землі до середини вертикального електроду:

$$t = h + \frac{l_{в}}{2} = 0{,}5 + 1{,}75 = 2{,}25 \text{ м.} \qquad (4.2)$$

Приймаємо відстань між вертикальними електродами а = 3,5 м. Опір одиночного вертикального заземлювача [19]:

$$R_{в} = \frac{\rho \cdot \psi}{2 \cdot \pi \cdot l_{в}} \left(\ln \frac{2 \cdot l_{в}}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot t + l_{в}}{4 \cdot t - l_{в}} \right); \qquad (4.3)$$

$$R_{в} = \frac{87 \cdot 1{,}3}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 3{,}5} \left(\ln \frac{2 \cdot 3{,}5}{0{,}02} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2{,}25 + 3{,}5}{4 \cdot 2{,}25 - 3{,}5} \right) = 31 \text{ Ом.}$$

Знаходимо орієнтовне число вертикальних заземлювачів:

$$n^{\text{орієнт}} = \frac{R_{в}}{R_{и}} = \frac{31}{6{,}67} = 4{,}6 \text{ шт.}$$

Знаходимо по [19] орієнтовний коефіцієнт використання вертикальних електродів:

$$\eta^{\text{орієнт}} = 0{,}7.$$

Знаходимо число вертикальних заземлювачів:

$$n = \frac{R_в}{R_и \cdot \eta_в} = \frac{31}{6{,}67 \cdot 0{,}7} = 6{,}63. \quad (4.4)$$

Округлюємо число електродів до 7 і знаходимо коефіцієнт використання вертикальних електродів:

$$\eta_в = 0{,}73.$$

Знаходимо довжину горизонтального електроду. При розташуванні електродів в ряд довжина горизонтального електроду:

$$l_г = a \cdot (n-1) = (7-1) = 21 \text{ м}. \quad (4.5)$$

Приймаємо товщину горизонтального електроду b = 0,005 м.

Знаходимо опір горизонтального електроду:

$$R_г = \frac{\rho \cdot \psi}{2 \cdot \pi \cdot l_г} \cdot \ln \frac{2 \cdot l_г^2}{b \cdot h}; \quad (4.6)$$

$$R_г = \frac{87 \cdot 1{,}3}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 21} \cdot \ln \frac{2 \cdot 21^2}{0{,}005 \cdot 0{,}5} = 11{,}0 \text{ Ом}$$

Знаходимо по [19] коефіцієнт використання горизонтального електроду:

$$\eta_г = 0{,}65.$$

Знаходимо опір штучного заземлювача:

$$R_и = \frac{R_в \cdot R_г}{R_в \cdot \eta_г + n_в \cdot R_г \cdot \eta_г} = \frac{31 \cdot 11}{31 \cdot 0{,}73 + 7 \cdot 11 \cdot 0{,}65} = 4{,}69 \text{ Ом}.$$

Знаходимо загальний опір заземлювача:

$$R_и = \frac{R_е \cdot R_и}{R_е + R_и} = \frac{10 \cdot 4{,}69}{10 + 4{,}69} = 3{,}19 \text{ Ом.}$$

Оскільки опір заземлювача менш $R_д$ = 4 Ом, захисне заземлення виконано вірно. На рисунку 4.4 показана схема розташування заземлюючого пристрою.

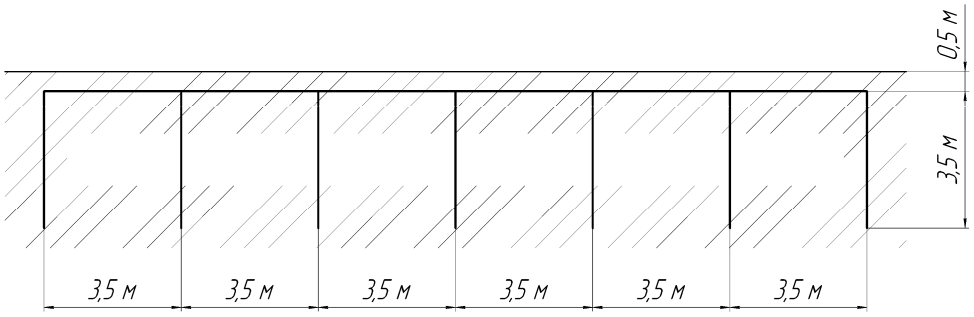


Рисунок 4.4 – Розташування електродів заземлюючого пристрою

Заземленою нейтраллю називається нейтраль електроустаткування, приєднана до заземлюючого пристрою безпосередньо або через малий опір.

Опір заземлення нейтралі джерела струму $r_о$ такий, щоб у разі замикання якої-небудь фази на землю через опір $r_{зм}$ напруга, під якою опиниться людина, що доторкнулася до зануленого корпусу або до нульового захисного дроту безпосередньо, не перевищувала деякої допустимої напруги дотику $U_{пр.доп.}$, В.

$$r_0 \le r_{зм} \frac{U_{пр.доп.}}{U_ф - U_{пр.доп.}} \qquad (4.7)$$

$$r_0 = 4 \frac{42}{220 - 42} = 0{,}94 \text{ Ом.}$$

За умовами безпеки дотику до занулених корпусів в період існування замикання фази на землю $r_{зм}$, $U_{пр.доп}$ повинні бути можливо меншого

значення. Тому приймається $r_{зм}$ = 4 Ом. Для виключення випадків замикання фази на металеві конструкції з малим опором розтіканню, ці конструкції сполучені з нульовим захисним провідником, тобто занулені.

Приміщення лабораторії відноситься до приміщення без підвищеної небезпеки. Основні ізолюючі захисні засоби для електроустановок і засоби захисту персоналу: діелектричні рукавички, слюсарний-монтажний інструмент з ізолюючими рукоятками, покажчики напруги, захисні окуляри, щитки і т.п.

4.3 Пожежна та техногенна безпека

По пожежній небезпеці будівля, в якій знаходиться лабораторії де збирають і випробують джерела живлення компресора холодильної установки відноситься до категорії Д – матеріали в холодному стані [20].

Можливі причини виникнення пожежі:

1) Несправність електричної проводки;
2) Несправність приладів і устаткування, що живляться від мережі;
3) Несправність захисного заземлення;
4) Необережне поводження з вогнем.

У зв'язку з цим необхідно передбачити наступні заходи по пожежній безпеці:

– забезпечити облаштуваннями протипожежних перешкод у будівлі, системі вентиляції, опалювальних і кабельних комунікаціях;

– проводити ретельну ізоляцію усіх струмоведучих провідників до робочих місць; періодичний огляд і перевірку ізоляції;

– проводити інструктаж співробітників, на випадок виникнення пожежі.

Для гасіння пожеж в приміщенні лабораторії площею 45 м^2 передбачений вуглекислотний вогнегасник ОУ–5 – 1 шт. (клас пожежі Е – горіння електроустановок під напругою) [20,21].

Вогнегасник розташований таким чином, щоб він був захищений від впливу прямих сонячних променів, механічних впливів та інших несприятливих чинників, таких як вібрація, підвищена вологість та інших. Вогнегасник розміщений у легкодоступному і помітному місці. Кожен співробітник в обов'язковому порядку ознайомлений з правилами експлуатації вогнегасників [22].

У лабораторії застосований димовий оповісник ІП 212, який спрацьовує при скупченні диму в приміщенні.

З метою попередження прямого удару і другорядних проявів блискавок, будівля обладнана системою блискавкозахисту.

Громовідвід складається з трьох основних частин: приймача блискавки, який безпосередньо приймає удар блискавки; струмовідводу (спуску), що сполучає приймача блискавки з заземлювачем, і заземлення, через яке струм блискавки переходить безпосередньо в землю.

Вертикальна конструкція – частина будівлі, яка призначена для закріплення приймача блискавки і струмовідводу – опора – виготовлена з газових труб і встановлена на даху будівлі.

У разі виникнення пожежі, яку не можливо локалізувати власними силами, треба:

1. Подзвонити по телефону 101, викликати пожежну службу.

2. Знеструмити все устаткування.

3. Зачинити всі вікна.

4. Покинути приміщення.

5. Прикрити за собою двері.

Для запобігання дії на людей небезпечних чинників пожежі, передбачена можливість швидкої евакуації людей з будівлі. Число евакуаційних виходів два – в протилежних кінцях і ведуть через сходову клітку назовні [4]. Максимальна відстань від найбільш віддаленого робочого місця до евакуаційного виходу і необхідний час евакуації людей з приміщень виробничих будівель при категорії виробництва по пожежній небезпеці Д не обмежується.. В лабораторії

евакуація відбувається за планом на випадок виникнення пожежі (рис. 4.5). Інструкція про заходи пожежної безпеки (план евакуації людей), включає загальну інструкцію будинку і інструкцію для окремого приміщення.

З планом дій при аварійній ситуації кожен робітник ознайомлений.

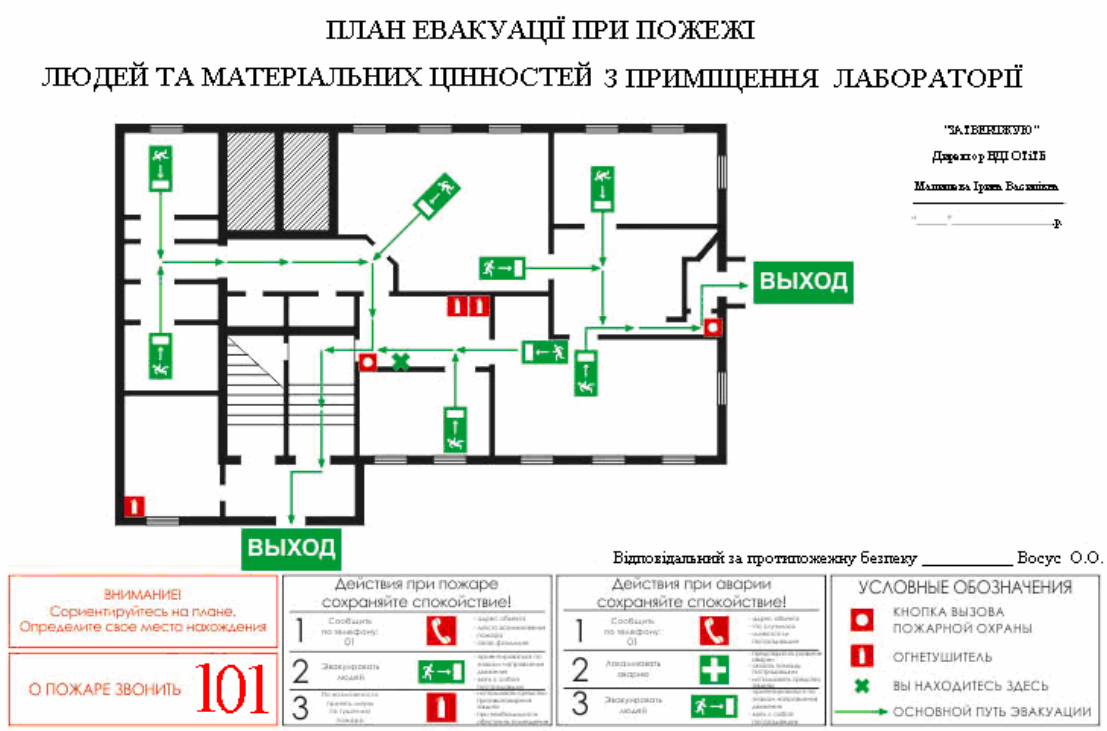


Рисунок 4.5 – План евакуації при пожежі людей, що працюють в лабораторії

5 ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОВЕДЕННЯ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

5.1 Етапи проведення наукового дослідження

При підготовці та проведенні дослідження виділяють кілька етапів, які відрізняються один від одного характером і змістом, формами і процедурами дослідницької діяльності. Ці етапи взаємозв'язані і об'єднані логікою єдиного дослідницького задуму [23].

I. Підготовчий етап

На цьому етапі уточнюється тема, складається програма дослідження, визначається вибірка, розробляється інструментарій, складаються графіки робіт, проводяться організаційні заходи.

Робочий план має довільну форму. Перед складанням робочого плану необхідно усвідомити черговість і логічну послідовність виконання намічених завдань дослідження, розробити стратегію і тактику виконання наукового дослідження по своїй роботі.

Для того, щоб правильно провести дослідження, необхідно розробити програму, в якій повинна бути викладена загальна концепція дослідження. Програма включає наступні етапи:

1. Визначення проблеми.

Визначити наукову проблему дослідження – не завжди просте завдання. Дуже важливо обдумано підходити до формулювання теми дослідження, щоб заявлена тема дійсно відображала існуючу проблему.

2. Виявлення об'єкта дослідження.

Об'єкт - це та область дійсності, яка містить певні протиріччя (тобто є носієм проблемної ситуації) і на яку спрямовано процес пізнання. Іншими словами, те, на що спрямоване дослідження.

3. Виявлення предмета дослідження.

Предмет - це властивості, сторони, особливості об'єкта, які в найбільш повному вигляді висловлюють досліджувану проблему і підлягають вивченню.

4. Позначення мети дослідження.

Мета дослідження повинна орієнтувати на кінцевий результат дослідження.

5. Визначення завдань.

Завдання дослідження - необхідні засоби реалізації поставленої мети. Неможливо в одному дослідженні вирішити далеко рознесені завдання. Вони повинні конкретизувати мету дослідження, задавати рамки.

6. Висунення гіпотез.

Гіпотеза - наукове припущення про стан об'єкта, про структуру зв'язків між складовими його елементами. Якщо мета дослідження - це питання, то гіпотеза – передбачуваний відповідь на це питання. В процесі дослідження гіпотеза може підтвердитися, а може спростувати. Головні вимоги до гіпотези - наукова обґрунтованість, відповідність раніше встановленим фактам, принципова змога перевірити.

7. Інтерпретація понять.

Інтерпретація понять - процедура тлумачення, уточнення змісту понять, що складають концептуальну схему дослідження.

Після того, як розроблена програма, слід приступити до розробки інструментарію дослідження, відповідного обраному методу збору інформації.

II. Збір наукової інформації

1. Визначення основних джерел наукової інформації.

2. Вивчення літератури.

При роботі з літературою, увага звертається на:

- загальну характеристику галузі дослідження;

- класифікацію основних напрямів досліджень в даній області, які практично використовуються та знаходяться в стадії розробки спрямування;

- різні точки зору на вирішення проблеми;

- результати існуючих досліджень по кожному розділу класифікації, по використовуваному методу;

- застосовуваний науковий апарат.

При роботі з літературою зручно користуватися картками (комп'ютерними файлами), в які крім бібліографічних даних включається коротка анотація статті або книги, ваше ставлення до неї, можливість використання в роботі.

Переглядається вся відома література по темі і складаються файли, потім переходять до докладного вивчення відібраних джерел. Робляться позначки та зауваження в файлах.

Зібрану інформацію групують по главам, параграфам і розділах. Для зручності користуються для цих цілей окремими папками.

III. Написання та оформлення наукової роботи.

Загальними вимогами, що пред'являються до студентської наукової роботи, є: чіткість побудови, логічна послідовність викладеного матеріалу, переконлива аргументація, стислість і точність формулювань, конкретність викладу результатів роботи, переконливість висновків і обґрунтованість рекомендацій, практична значимість, ретельність і акуратність оформлення.

Структура студентської й наукової роботи аналогічна структурі дипломної і курсової робіт за невеликим винятком:

а) титульний лист;

б) завдання на дипломну роботу;

в) реферат;

г) зміст;

д) перелік скорочень, умовних позначень, символів, одиниць і термінів;

е) вступ;

ж) основна частина;

з) висновки;

і) список посилань;

к) програми.

Прийняті в науковій роботі малопоширені скорочення, умовні позначення, символи, одиниці і специфічні терміни повинні бути представлені у вигляді окремого списку.

Основна частина роботи повинна відображати наступні етапи:

а) вибір напрямку досліджень;

б) теоретичні або експериментальні дослідження;

в) узагальнення і оцінка результатів дослідження.

Відповідно до перерахованих етапів в основній частині роботи необхідно відобразити наступне.

1. Обґрунтування вибору прийнятого напрямку дослідження, методи вирішення задач і їх порівняльну оцінку, розробку загальної методики проведення наукових досліджень, аналіз та узагальнення існуючих результатів.

2. Характер і зміст теоретичних досліджень, обґрунтування необхідності проведення експериментальних робіт для підтвердження особливих положень теоретичних досліджень або отримання конкретних значень параметрів, зіставлення результатів експерименту з теоретичними дослідженнями.

3. Узагальнення та оцінка результатів досліджень, включаючи оцінку повноти вирішення поставленого завдання і пропозиції щодо подальших напрямків робіт, оцінку достовірності отриманих результатів та їх порівняння з аналогічними результатами вітчизняних і зарубіжних робіт, обґрунтування необхідності проведення додаткових досліджень, негативні результати, що призводять до необхідності припинення подальших досліджень .

Вимоги до інших розділах наукової роботи аналогічні вимогам до структурних елементів дипломної роботи.

Обсяг наукової роботи – від 50 сторінок машинописного тексту, виконаного через 1,5 міжрядкових інтервалів (38-41 рядок).

IV. Представлення результатів дослідження

1. Написання статей.

2. Участь у конференціях.

Робоча структура дослідницького проекту будується в результаті декомпозиції робіт, визначає об'єм робіт, виконання яких призводить до досягнення мети проекту (рисунок 5.1).

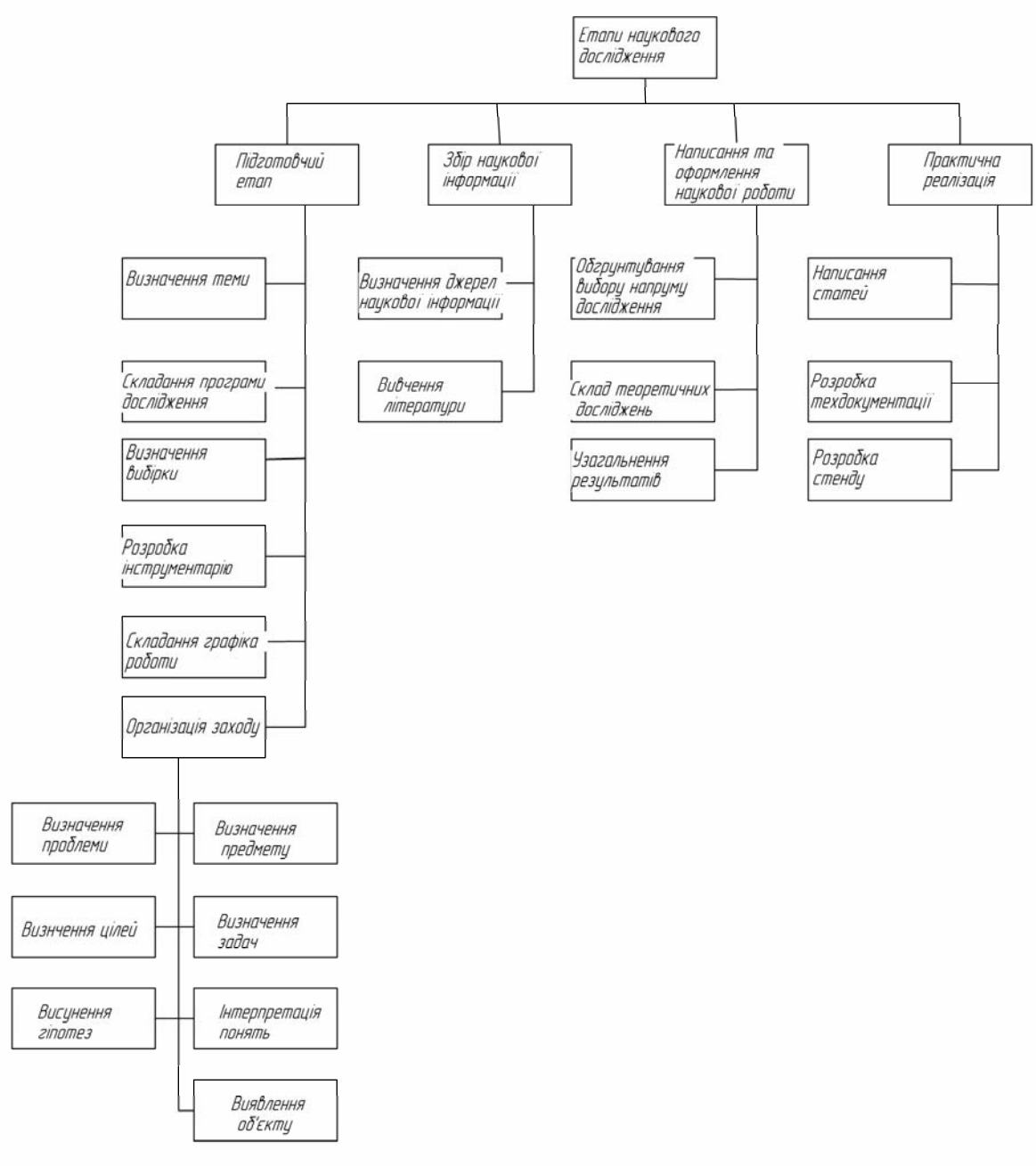


Рисунок 5.1 – Структурний графік наукового дослідження

5.2 Сітьове планування

Сітьове планування – це графічне подання робіт проекту, що відображає їх послідовність та взаємозв'язок. Сітьове планування розглядається на прикладі стрілчатого графіку. Стрілчастий графік являє собою граф, вузлам якого відповідають події, а стрілкам – роботи [24].

На першому етапі побудови сіткового графіку потрібно визначитись з порядком виконання робіт. Ця інформація зображується у формі таблиці характеристики робіт (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Характеристика робіт за проектом

Код роботи	Назва чи зміст роботи	Безпосередньо попередня робота	Тривалість, діб
1.1.1	Визначення теми	–	10
1.1.2	Складання програми дослідження	–	5
1.1.3	Визначення вибірки	–	20
1.1.4	Розробка інструментарію	–	5
1.1.5	Складання графіка роботи	–	5
2.1.1	Організація проведення дослідження	1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, 1.1.4, 1.1.5	65
2.1.2	Визначення проблеми	2.1.1	5
2.1.3	Визначення об’єкта дослідження	2.1.1	5
2.1.4	Вивчення літератури	2.1.1	30
3.1.1	Обґрунтування вибору прийнятого напрямку дослідження	2.1.2, 2.1.3, 2.1.4	10
4.1.1	Характер та зміст теоретичних досліджень	3.1.1	30
5.1.1	Розробка стенду для наукових досліджень	1.3.1	60
5.1.2	Розробка технічної документації	5.1.1	20
5.1.3	Проведення експериментів	5.1.1	20
6.1.1	Узагальнення та оцінка результатів дослідження	4.1.1, 5.1.3	20
6.1.2	Написання наукових статей	6.1.1	10
7.1	Оформлення результатів роботи	6.1.1	30

Отриманий стрілчастий графік показаний на рисунку 5.2

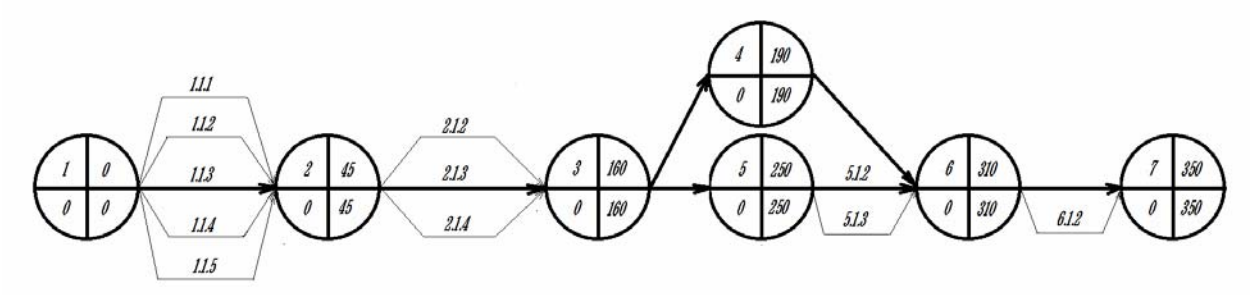


Рисунок 5.2 – Стрілчастий графік наукового дослідження

ВИСНОВКИ

В ході виконання випускна кваліфікаційної роботи освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр», на підставі розглянутих літературних джерел щодо фотоелектричного перетворення сонячної енергії, промислової технології сонячних елементів, перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію з допомогою напівпровідникових елементів проведений аналіз показав, що параметри роботи ФЕП в залежності від умов їх експлуатації висвітлені недостатньо.

Ряд проблем, пов'язаних із застосуванням сонячній енергетиці зосереджується в області не пов'язаної безпосередньо з фотоперетворювачем. Ці проблеми знаходяться в області перетворювальної техніки, точніше, в області спряження засобів перетворювальної техніки з первинним джерелом енергії – фотоперетворювачами.

В залежності від освітленості фотоелемента, спектрального складу падаючого світла, температури характеристика видозмінюється, породжуючи сімейство вольт-амперних характеристик фотоперетворювача.

Для проведення експерименту був розроблений та виготовлений лабораторний стенд для дослідження динамічних характеристик фотоперетворювача. Опис стенду, його схеми і розрахунки функціональних вузлів приведені в розділі «Розробка лабораторного стенду».

У роботі розглянуті питання безпечного проведення досліджень та організації проведення наукових досліджень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Phillips C. L., Harbor R. D. Feedback Control Systems. N.J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 2000. 658 p.

2. D. Alekseevskiy, O. Pankova, R . Khrestin, "Procedure for the synthesis of models of electro-technical complexes"// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, – 2018. – № 6/9(96). - С. 48-54.

3. Резонанс – друг і ворог: веб-сайт. URL: https://kpi.ua/resonance (дата звернення: 09.09.2024).

4. Явище резонансу: веб-сайт. URL: https://skysmart.com/articles/physics/yavlenie-rezonansa (дата звернення: 12.09.2024).

5. 3KW High Efficiency LLC Evaluation Board & Reference Design: веб-сайт. URL: https://gansystems.com/evaluation-boards/gs-evb-llc-3kw-gs/ (дата звернення: 14.10.2024).

6. 200W LED driver using the STNRG012: веб-сайт. URL: https://gansystems.com/evaluation-boards/gs-evb-llc-3kw-gs/ (дата звернення: 14.10.2024).

7. AN-6104. LLC Resonant Converter Design using FAN7688: веб-сайт. URL: https://www.onsemi.com/pub/collateral/an-6104.pdf (дата звернення: 21.10.2024).

8. Фізика твердого тіла: Енциклопедичний словник / Гол. ред. В.Г. Барьяхтар. Т. 1, 2. Київ: Наукова думка, 1998. 345 с.

9. Brennan K.F. Physics of semiconductors with application to optoelectronic devices. Cambridge University press, 1999. 762 p.

10. Оксанич, *А.П.* Сучасні технології виробництва кремнію та кремнієвих фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії [Текст] / А.П. Оксанич, В.А Тербан, С.О. Волохов, М.І. Клюй, В.А. Скришевський, В.П. Костильов, А.В. Макаров // Монографія. – Кривий Ріг: Мінерал. – 2010. - 266 с. - ISBN 978-966-7830-IS-0

11. Karl W. Boer, Udo W. Pohl. Semiconductor Physics. Second Edition. Springer Nature Switzerland AG 2023.

12. *Adel Ben Arab* Photovoltaic properties and high efficiency of preferentially doped polysilicon solar cells [Текст] / Adel Ben Arab // Solid State Electron. – 1995. - № 8. – P.1441-1442.

13. Schubert, T. F. Jr and Kim, E. M. 2015. Fundamentals of electronics: Book 2. Synthesis Lectures on Digital Circuits and Systems 10, no. 2: 1–366.

14. Kishore, K. L., 2008. Electronic Devices and Circuits, BS Publications, Hyderabad.

15. І.М. Івах, Я.І. Бедрій, Б.О. Білінський, М.М. Козяр Основи охорони праці. Навчальний посібник 4-те видан. Перераб. і доповн. Київ: Кондор, - 2010. 464с.

16. ГОСТ 12.1.005-88 Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони.

17. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. Охорона праці. 1998. № 6. С. 29-44.

18. Пістун І.П., Хобзей М.К., Сілін Т.В. Працездатність та здоров'я людини: Навчальний посібник/ За ред. к.т.н., доцента І.П. Пістуна. Львів: Афіша, 2003.

19. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів та Правила техніки безпеки під час експлуатації електроустановок споживачів. Київ, 2009.

20. НАПБ А.01.001-2004 Правила пожежної безпеки в Україні.

21. НАПБ Б.03.002-2007 Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

22. НАПБ Б.03.001-2204. Типові норми належності вогнегасників.

23. Xiao, Hong. 2001. Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology, Pearson Prentice Hall, p. 453.

24. Методичні вказівки до проведення практичних занять та самостійної роботи з дисципліни «Моделі та методи управління проектами» для студентів спеціальності: 8.090803 - «Електронні системи». Укл.: Алексієвський Д.Г. Запоріжжя. ЗДІА, 2010.

25. Li G., Shittu S. A review of solar photovoltaic-thermoelectric hybrid system for electricity generation / Guiqiang Li, Samson Shittu // Energy, Volume 158, Septem №1 PP. 41-58

Додаток А

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				Документація		
A1			ЕІСПЗ МР.23328.00.00.00.00.Д1	Дослідження вольт-амперних характеристик фотоперетворювачів		
				Карти інсоляції		
A1			ЕІСПЗ МР.23328.00.00.00.00.Д2	Дослідження вольт-амперних характеристик фотоперетворювачів		
				Принцип роботи сонячного елемента		
A1			ЕІСПЗ МР.23328.00.00.00.00.Е2	Дослідження вольт-амперних характеристик фотоперетворювачів		
				Стенд для досліджень		
				Схема електрична функціональна		
A1			ЕІСПЗ МР.23328.00.00.00.00.Е3	Дослідження вольт-амперних характеристик фотоперетворювачів		
				Стенд для досліджень		
				Схема електрична принципова		
A4			ЕІСПЗ МР.23328.00.00.00.00.ПЕ3	Дослідження вольт-амперних характеристик фотоперетворювачів		
				Стенд для досліджень		
				Перелік елементів		

Перв. застосув. | Довід. № | Підп. і дата | Інв. № дубл. | Взам. інв. № | Підп. і дата | Інв. № подл.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.		Гагошидзе		5.12
Перевір.		Критська		5.12
Н.контр.		Туришев		5.12
Затверд.		Критська		5.12

ЕІСПЗ МР.23328.00.00.00.00

Дослідження вольт-амперних характеристик фотоперетворювачів

Літ.	Аркуш	Аркушів
	1	2

ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ
8.1713

Копіював

Формат А4

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
А1			ЕІСПЗ МР.23328.00.00.00.00.Д3	Дослідження вольт-амперних характеристик фотоперетворювачів		
				Моделювання динамічних характеристик фотоперетворювача		
А1			ЕІСПЗ МР.23328.00.00.00.00.Д4	Дослідження вольт-амперних характеристик фотоперетворювачів		
				Вольт-амперна характеристика сонячного елементу на основі мультикристалічного кремнію		
А1			ЕІСПЗ МР.23328.00.00.00.00.Д5	Дослідження вольт-амперних характеристик фотоперетворювачів		
				Стенд для досліджень		
				Заземлюючий пристрій		
А1			ЕІСПЗ МР.23328.00.00.00.00.Д6	Дослідження вольт-амперних характеристик фотоперетворювачів		
				Стрілчастий графік проекту		

Інв. № подл. | Підп. і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підп. і дата

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ЕІСПЗ МР.23328.00.00.00.00	Арк. 2

Копіював Формат А4

Додаток Б

Зона	Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
	A1	Плата стенду для досліджень	1	
	C1, C2	Конденсатор SK 4700,0 мкФ 50 В Jamicon 1835	2	1626...1636
	C3, C4	Конденсатор GRM42-6 X5R 105 ±20% 50 muRata	2	1,0 мкФ 1206
	C5	Конденсатор SK 100,0 мкФ 50 В Jamicon 0612	1	
	C6	Конденсатор GRM42-6 X5R 104 ±20% 50 muRata	1	0,1 мкФ 1206
	C7	Конденсатор GRM42-6 X5R 103 ±20% 50 muRata	1	0,01 мкФ 1206
	C8	Конденсатор SK 470,0 мкФ 50 В Jamicon 0817	1	
	C9	Конденсатор GRM42-6 X5R 103 ±20% 50 muRata	1	0,01 мкФ 1206
	C10	Конденсатор SK 100,0 мкФ 25 В Jamicon 0612	1	
	C11	Конденсатор GRM42-6 X5R 104 ±20% 50 muRata	1	0,1 мкФ 1206
	C12	Конденсатор GRM42-6 X5R 203 ±20% 50 muRata	1	0,02 мкФ 1206
	DA1	Діодний міст KBL02 DC Components	1	
	DA2	Мікросхема LM2596T-ADJ Texas Instruments	1	
	DA3	Мікросхема MAX471EPA MAXIM	1	
	DA4	Мікросхема КР1006ВИ1 БК0.348.685 ТУ	1	
	DA5	Мікросхема КР142ЕН12А бКО.348 834-07 ТУ	1	
	DA6	Мікросхема КР1006ВИ1 БК0.348.685 ТУ	1	
	FU1	Предохранитель плавкий 32S-0250H Hollyland	1	
	L1	Дроссель RLB0914-330K Bourns	1	
	R1	Резистор R-1206 1% 620 Ом muRata	1	
	R2	Резистор R-1206 1% 2,0 кОм muRata	1	
	R3	Резистор R-1206 1% 5,6 кОм muRata	1	
	R4, R5	Резистор R-1206 1% 1,0 МОм muRata	2	

Перв. застосув. | Довід. № | Підп. і дата | Інв. № дубл. | Взам. інв. № | Підп. і дата | Інв. № подл.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ЕІСПЗ МР.23328.00.00.00.00.ПЕЗ		
Розроб.		Гагошидзе		5.12	Дослідження вольт-амперних характеристик фотоперетворювачів Стенд для досліджень Перелік елементів	Літ.	Аркуш 1 / Аркушів 3
Перевір.		Критська		5.12		ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ 8.1713	
Н.контр.		Туришев		5.12			
Затверд.		Критська		5.12			

Копіював Формат А4

продовження Додатку Б

Зона	Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
	R6	Резистор R-1206 1% 5,6 кОм muRata	1	
	R7	Резистор R-1206 1% 10 кОм muRata	1	
	R8	Резистор R-1206 1% 1,0 кОм muRata	1	
	R9, R10	Резистор R-1206 1% 4,3 кОм muRata	2	
	R11	Резистор R-1206 1% 680 Ом muRata	1	
	R12	Резистор R-1206 1% 240 Ом muRata	1	
	R13	Резистор R-1206 1% 4,7 кОм muRata	1	
	R14	Резистор R-1206 1% 5,6 кОм muRata	1	
	R15, R16	Резистор R-1206 1% 1,0 МОм muRata	2	
	R17	Резистор R-1206 1% 5,6 кОм muRata	1	
	R18	Резистор R-1206 1% 8,2 кОм muRata	1	
	R19	Резистор R-1206 1% 1,0 кОм muRata	1	
	R20, R21	Резистор R-1206 1% 120 Ом muRata	2	
	R22	Резистор R-1206 1% 1,0 кОм muRata	1	
	T1	Трансформатор сетевой TH 60/30 G 220/15 50 Гц		
		ДСТУ IEC 61558-2-1	1	
	VD3	Діод 1N5822 ON Semiconductor	1	
	VD2...VD5	Діод DL4148 MIC	4	
	VT1, VT2	Транзистор BC848A VISHAY Semiconductors	2	n-p-n, SOT-23
	VT3	Транзистор IRF510 International Rectifier	1	
	X1	Клеммник DG300-04P 5,0 Degson	1	
	X2	Клеммник DG308-04P 2.54 Degson	1	
	X3	Клеммник DG308-03P 2.54 Degson	1	
	X4	Клеммник DG308-04P 2.54 Degson	1	
	X5	Клеммник DG308-05P 2.54 Degson	1	
	X6	Клеммник DG308-02P 2.54 Degson	1	
	X7, X8	Клеммник DG308-03P 2.54 Degson	2	
	X9	Клеммник DG308-02P 2.54 Degson	1	

Інв. № подл. | Підп. і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підп. і дата

Зм. Арк. № докум. Підп. Дата

ЕІСПЗ МР.23328.00.00.00.00.ПЕЗ

Арк. 2

Копіював

Формат А4

продовження Додатку Б

Зона	Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
	A2	Світлодіодний випромінювач	1	
	VD1...VD7	Світлодіод PM6B-3LFx ProLight	7	
	PB1	Люксметр - тип приладу визначається експериментом	1	
	PA1	Амперметр - тип приладу визначається експериментом	1	
	PV1	Вольтметр - тип приладу визначається експериментом	1	
	R1	Резистор змінний 3321 10,0 кОм ± 10% muRata	1	
	R2, R3	Резистор змінний 3321 50,0 кОм ± 10% muRata	2	
	R4, R5	Резистор змінний 3321 62,0 кОм ± 10% muRata	2	
	R6	Резистор змінний 4251 10,0 кОм ± 10% muRata	1	
	R7	Резистор змінний 4251 1,0 кОм ± 10% muRata	1	
	SA1	Мережевий перемикач R19-201 R Switronic	1	
	SA2, SA3	Геремикач R13-502A SPST R Switronic	2	
	VD1	Светодиод GNL-5013 UGW G-NOR Optoelectronics	1	
	VD2	Светодиод GNL-5013 URW G-NOR Optoelectronics	1	
	VD3	Фотоперетворювач досліджуваний	1	
	X1	Вилка сетевая плоская тип C CEE 7/16 (Europlug)		
		2,5 A/250 B	1	

Інв. № подл. | Підп. і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підп. і дата

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ЕІСПЗ МР.23328.00.00.00.00.ПЕЗ	Арк. 3

Копіював Формат А4