

Вінницький національний технічний університет  
Факультет комп'ютерних систем та автоматики  
Кафедра метрології та промислової автоматики

**Пояснювальна записка  
до магістерської кваліфікаційної роботи**

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Полікристалічний фотоелектричний перетворювач сонячної енергії у електричну з покращеним коефіцієнтом перетворення світла

Виконав: студент групи КІВТ-18м

спеціальності

152 Метрологія та інформаційно-  
вимірювальні технології

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Барабаш В.А.

Керівник: к.т.н., ст. викладач каф. МПА

Дудатьєв І.А.

(прізвище та ініціали)

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2019 р.

Рецензент: к.т.н., доц. каф. ЛОТ

Лисенко Г.Л.

(прізвище та ініціали)

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2019 р.



## РЕФЕРАТ

В даній магістерській кваліфікаційній роботі виконано аналіз техніко-економічних параметрів різноманітних сучасних фотопанелей, а також фотопанелей з буферними акумуляторами енергії при використанні енергії сонячного випромінювання.

Проведено технічний та економічний розрахунок параметрів нової розробки полікристалічного фотоелектричного перетворювача сонячної енергії у електричну з покращеним коефіцієнтом перетворення світла, який є вище середнього. При порівнянні нової розробки з аналогом виявлено, що вона є якіснішою і конкурентоспроможнішою відносно аналога, а також краще по технічним і економічним показникам.

Проведено розрахунок основних метрологічних характеристик нової розробки.

## REFERAT

In this master's qualification work the analysis of the technical and economic parameters of various modern photographic panels, as well as photographic panels with buffer energy accumulators when using the energy of solar radiation, was performed.

The technical and economical calculation of the parameters of the new development of the polycrystalline photovoltaic solar energy converter into electric with the improved coefficient of light conversion, which is above average, is carried out. When comparing the new development with the analogue, it was found that it is better and more competitive than the analogue, as well as better in technical and economic indicators.

The basic metrological characteristics of the new development have been calculated.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	10
1.1. Теоретичний аналіз об'єкту дослідження .....	10
1.2. Існуючий досвід впровадження зарядних станцій на основі фото панелей .....	16
1.3 Сфери використання фото панелей. Переваги та недоліки ФП як ВП.....	18
2 ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ ВП.....	22
2.1 Фотоелектричний вимірювальний перетворювач .....	22
2.2 Рівняння та графік перетворення.....	30
3 РОЗРОБКА СТРУКТУРНА ТА ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМИ ВП.....	38
4 МАТЕМАТИЧНЕ ОПИСАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАРЯДЖЕННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	41
4.1. Існуючі теоретичні підходи до математичного описання процесу перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну фотоелектричними установками.....	41
4.2. Аналіз впливу кліматометеорологічних умов на роботу ЗСЕМ з використанням фотоелектричних установок.....	46
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	53
5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки .....	53
5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи.....	60
5.3 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації результатів розробки .....	67
5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності..	68
5.5 Висновки до економічного розділу.....	70
Висновки .....	71
Список літератури.....	73

Додатки.....	78
Додаток А(обов'язковий) ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ .....	79
Додаток Б Лістинг програми контролю.....	81
Додаток В Вигляд експериментальної фотопанелі.....	83

## ВСТУП

Вимірювання – це єдиний засіб одержання кількісної інформації про величини, які характеризують ті чи інші фізичні явища та процеси. Згідно з ДСТУ під вимірюванням розуміють знаходження дослідним шляхом за допомогою технічних засобів значень фізичної величини, які вибираються з прийнятої шкали цих значень. Вимірювальне перетворення являє собою відображення розміру однієї фізичної величини розміром іншої фізичної величини, що функціонально з нею пов'язана. Використання вимірювальних перетворень є єдиним методом практичної побудови будь-яких вимірювальних пристроїв, тому що кожний вимірювальний засіб використовує ті чи інші функціональні зв'язки (найпростіші або більш складні) між вхідною та вихідною величинами.

Вимірювальний перетворювач – це технічний пристрій, який побудований на певному фізичному принципі дії і виконує одне часткове вимірювальне перетворення. Поняття “вимірювальний перетворювач” значно більш вузьке, більш конкретне, ніж поняття “вимірювальне перетворення”, тому що одне й теж вимірювальне перетворення може виконуватися цілою низкою різних за принципом дії вимірювальних перетворювачів.

Об'єктами дослідження у даній роботі є сонячні панелі та фотоелектричні перетворювання в цілому. Відомо, що в даний час однією з ключових економічних проблем української держави є велика енергоемність промисловості і залежність від експортера енергоресурсів. Окрім енергозберігаючої політики Україні життєво необхідно розвивати власні енергоресурси.

В якості такого енергоресурсу доцільно розглядати енергію сонця. Наприклад, використання лише 0,0125% енергії сонця, що надходить на Землю, могло б забезпечити всі сучасні потреби людства в енергії. Крім того, енергія сонця є поновлюваним і екологічно чистим джерелом енергії.

Одним з перспективних напрямків використання сонячної енергії є її безпосереднє перетворення в електрику за допомогою напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів (ФЕП). У даний час і в межах найближчого майбутнього основним матеріалом для виробництва ФЕП був, є і буде кремній.

Сучасні тенденції в світовій енергетиці стимулюють істотне зростання інтересу до альтернативних джерел енергії. ФЕП або сонячні панелі є найбільш перспективними, екологічно чистими кандидатами на зменшення нафтової залежності світу і, на відміну від органічних і неорганічних джерел енергії, перетворюють сонячне випромінювання безпосередньо в електроенергію. Отже, дана тема є досить актуальною.

Виходячи з актуальності, метою магістерської роботи є розробка сонячних вимірювальних перетворювачів із покращеними метрологічними характеристиками.

**Метою роботи** є науково-технічне обґрунтування техніко-економічних параметрів фотопанелей з буферними акумуляторами енергії при використанні енергії сонячного випромінювання.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані та вирішені такі **задачі**:

- аналіз загальних понять сонячної радіації;
- основні параметри фотопанелей та методи їх вимірювань;
- методи та засоби вимірювання ККД панелей;
- схеми роботи фотопанелей.

**Об'єктом дослідження** є процеси перетворення енергії сонячного випромінювання і її використання в господарстві.

**Предметом дослідження** є методи та засоби, які забезпечують стабільну роботу фото панельних сонячних систем.

**Методи дослідження.** При вирішенні поставлених задач в роботі були використані методи теорії вимірювального контролю, похибок вимірювань та технічного контролю використовувались для визначення вірогідності



контролю, методи алгоритмізації та програмування для розроблення програмної частини засобу вимірювального контролю.

*Наукова новизна одержаних результатів:*

1. Одержав розвиток метод перетворення сонячної енергії у електричну з вертикальними р-n – переходами та комбінованою схемою підключення фотоелементів у загальній системі, який нав відміну від паралельний та послідовних схем підключень, дозволил покращити коефіцієнт перетворення світла на 1%.

2. Модифіковано математичну модель процесу зарядження акумуляторних батарей з використанням фотоелектричних установок та буферних акумуляторів енергії з урахуванням нелінійного характеру виробітку електроенергії та стохастичного характеру її споживання протягом доби.

*Практичне значення одержаних результатів.* У роботі отримані такі практичні результати:

1. Проаналізовано та представлено надходження сонячної радіації протягом доби та року для м.Вінниці на основі реальних експериментальних даних.

2. Розроблений програмний засіб для контролю електричних параметрів на виході сонячної панелі.

3. Розроблений та досліджений експериментальний зразок полікристалічного фотоелектричного перетворювача сонячної енергії у електричну з покращеним коефіцієнтом перетворення світла.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати, що представлені в магістерській роботі, одержані автором самостійно.

**Апробація** результатів магістерську кваліфікаційної роботи. Результати роботи обговорювалися на V Міжнародній науково-технічній конференції «ВКДТС-2019». (м. Вінниця).

**Публікації.** Результати роботи опубліковано у збірнику тез доповідей: Дудатьєв І.А., Барабаш В.А. Полікристалічний фотоелектричний

перетворювач сонячної енергії у електричну з покращеним коефіцієнтом перетворення світла // ВКДТС , 2019, с. 115-117.

**Обсяг і структура магістерської кваліфікаційної роботи.** Робота складається зі вступу, 5 розділів, основних висновків по роботі, переліку використаних джерел (23 Бібліографічних посилань, 3 сторінок), та додатків (4 сторінки). Загальний обсяг роботи в якому викладено основний зміст складає 80 сторінок і містить рисунків 30, таблиць 10. Повний обсяг магістерської кваліфікаційної роботи - 85 сторінок.

# 1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

## 1.1. Теоретичний аналіз об'єкту дослідження

Використання енергії відновлюваних джерел в даний час є одним із пріоритетних напрямів розвитку світової енергетики. Основною перевагою відновлюваних джерел енергії є їх невичерпність та екологічна чистота, що сприяє поліпшенню екологічного стану і не призводить до зміни енергетичного балансу на планеті [8]. Більшість проектів відновлюваної електрогенерації, що реалізуються в Україні, підключаються до централізованої мережі для передачі електроенергії споживачам. Однак згідно [3] відновлювані джерела енергії мають різноплановий вплив на роботу електричних мереж, який змінюється в залежності від потужності, типу, місця розташування та топології мережі. Крім того, відзначається загострення проблеми забезпечення стійкості за напругою при підключенні ВДЕ до електричних мереж. Станом на сьогоднішній день дане питання залишається не вирішеним.

Проте наявність великого вітроенергетичного потенціалу в 60 млрд. кВт/год (15 млн.т.н.е.) та фотоелектричного потенціалу в 5,7 млрд. кВт/год (1,4 млн.т.н.е.) [4] змушує шукати нові шляхи залучення відновлюваної енергетики до загального енергобалансу країни з метою скорочення споживання імпортованих енергоносіїв та покращення екологічної ситуації. Зважаючи на це, актуальним є розширення варіантів застосування автономних систем електроживлення на основі використання відновлюваних джерел енергії (далі – ВДЕ) без підключення до ОЕС.

Важливим, з точки зору розвитку світового ринку, є ринок електромобілів.

Зокрема, в 2018 році загальносвітовий показник продажу склав 1,98 млн. одиниць [5]. Лідируючими в цьому напрямку країнами виступили

Китай та Японія. В Європі відзначилися майже дворазовим збільшенням ринку екологічного транспорту. Такі швидкі темпи приросту ставлять актуальне питання будівництва зарядних станцій електромобілів. Робота таких зарядних станцій від централізованих мереж в нічний час сприятливо впливатиме на графік навантаження енергосистеми, однак в пікові періоди (з 800 по 1100 та з 1700 по 2100 години доби) збільшить пікове споживання, що негативно відобразиться на роботі мережі в цілому.

Одним з варіантів розширення застосування ВДЕ (в ракурсі збільшення кількості зарядних станцій електромобілів) є використання в якості джерела живлення автономних зарядних станцій електромобілів вітроелектричних, фотоелектричних чи комплексних вітро-сонячних енергоустановок. При цьому, впровадження зарядних станцій на основі ВДЕ не впливатиме на центральну електромережу (як відмічалось вище), підвищить показник використання енергетичного потенціалу відновлюваних джерел та покращить екологічну ситуацію місцевості, де рухаються електричні транспортні засоби.

Станом на сьогоднішній день робота таких зарядних станцій на основі ВДЕ вивчена в неповній мірі, що пояснюється відсутністю єдиних підходів до визначення умов реалізації станцій даного типу, режимів роботи відновлюваного джерела енергії в залежності від ємності тягових акумуляторних батарей електромобілів та методу зарядження АБ при врахуванні випадкового характеру виробітку, впливу надходження енергії вітру та сонячного випромінювання на вибір буферних акумуляторів станції та ін., що в свою чергу вимагає проведення пошукових робіт з вирішення даних завдань.

На сьогоднішній день є велика кількість промислових акумуляторів енергії різних типів (рис.1.1), що можуть застосовуватись в електротранспорті. Однак визначальними факторами їх застосування для конкретного виду електромобілів є питомі енергетичні показники. Згідно приведеної діаграми, найбільші перспективи залучення до технології

електромобільності мають літєві та літій-іонні АБ, а також паливні елементи, особливо на основі водню. Розвитку цих напрямків сьогодні приділяється багато науково-дослідних та пошукових робіт.

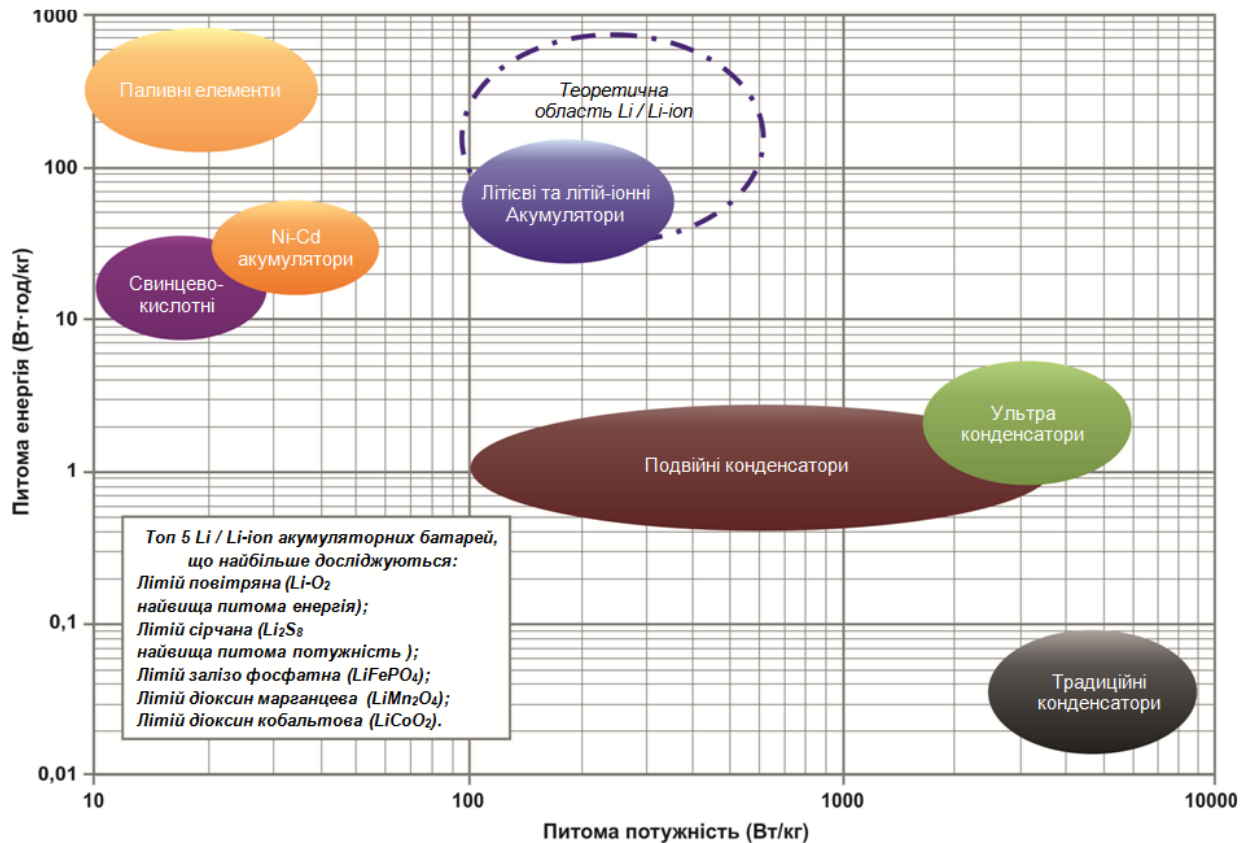


Рисунок 1.1 – Області застосування різних акумуляторів енергії в залежності від їх показників питомої енергії та питомої потужності згідно даних Логістичного агентства оборони Сполучених Штатів [6].

Згідно аналізу сучасних літературних даних розвитку світового ринку відновлюваної енергетики (рис.1.2) [57] та електротранспорту і зарядних станцій до нього встановлено, що він стабільно зростає, тобто відновлювана енергетика в енергетичній сфері так само, як і електротранспорт в транспортній галузі відіграють все більшу роль і за прогнозами експертів дана картина тільки підсилуватиметься.

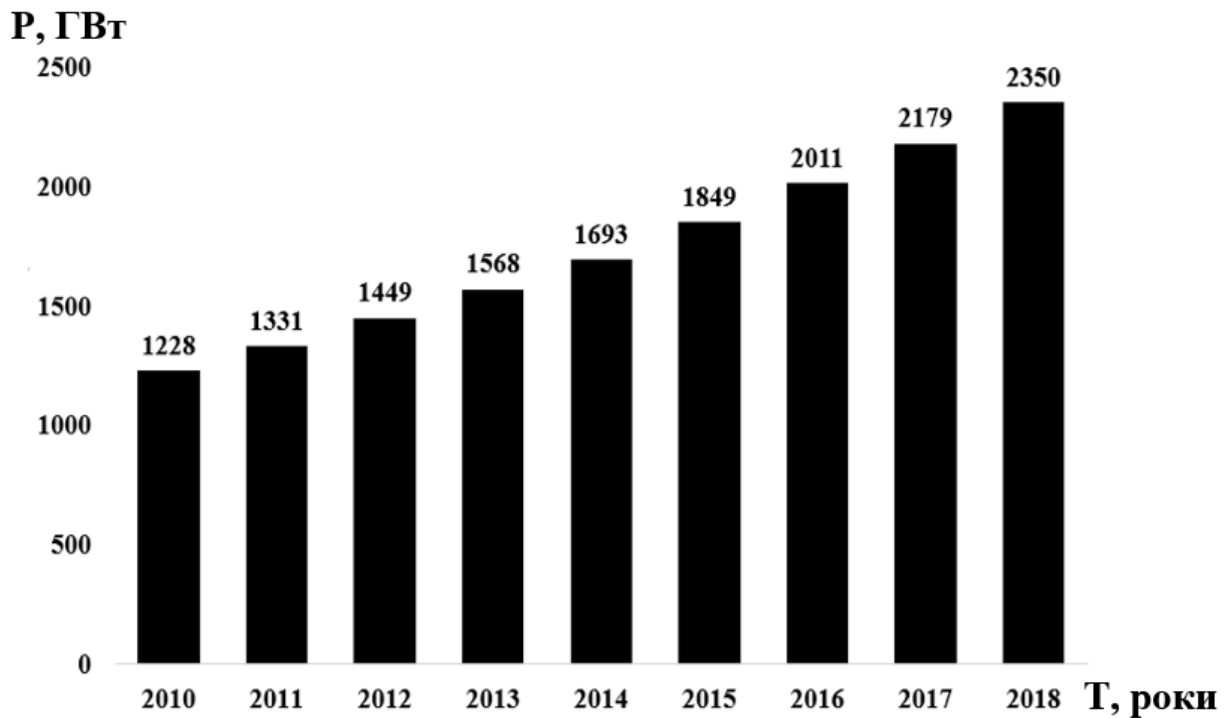


Рисунок 1.2 – Загальносвітова динаміка приросту сумарної встановленої об’єктів відновлюваної енергетики з 2010р. по 2018р.

Зокрема, сумарна встановлена потужність всіх об’єктів відновлюваної енергетики в світі на кінець 2018 року склала 2350 ГВт [57], тоді як приріст електромобілів (рис.1.4,а) на кінець 2018 року склав близько 5,12 мільйони одиниць (електричних та гібридних), а кількість зарядних станцій (повільного та швидкого заряду) досягла 5,22 млн (рис.1.4,б) [55].

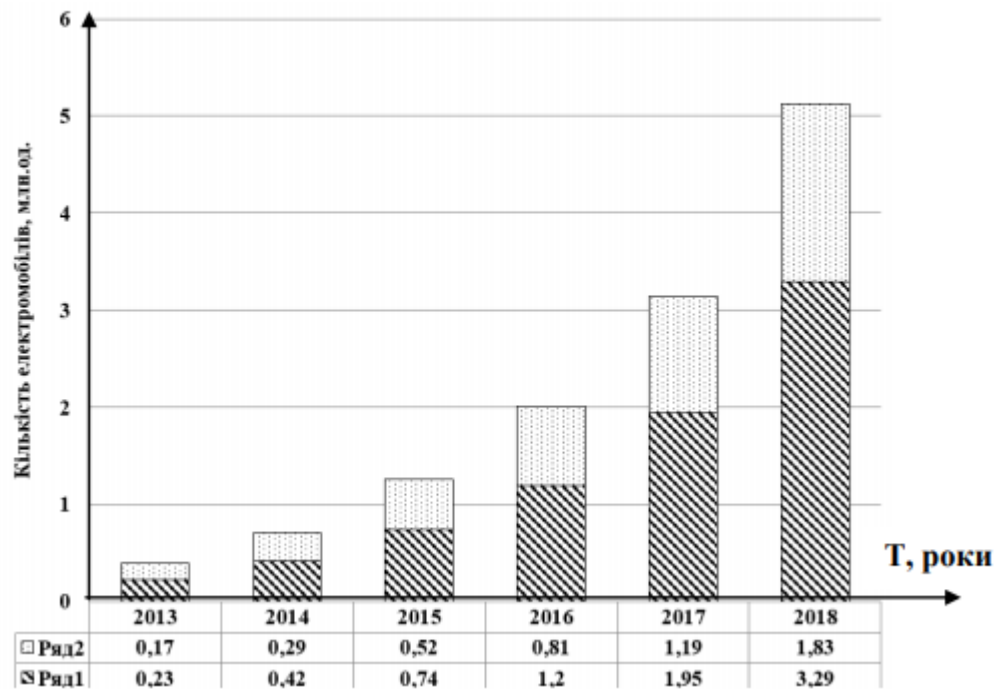


Рисунок 1.3 – Динаміка приросту електромобілів в світі з 2010р. по 2018р.

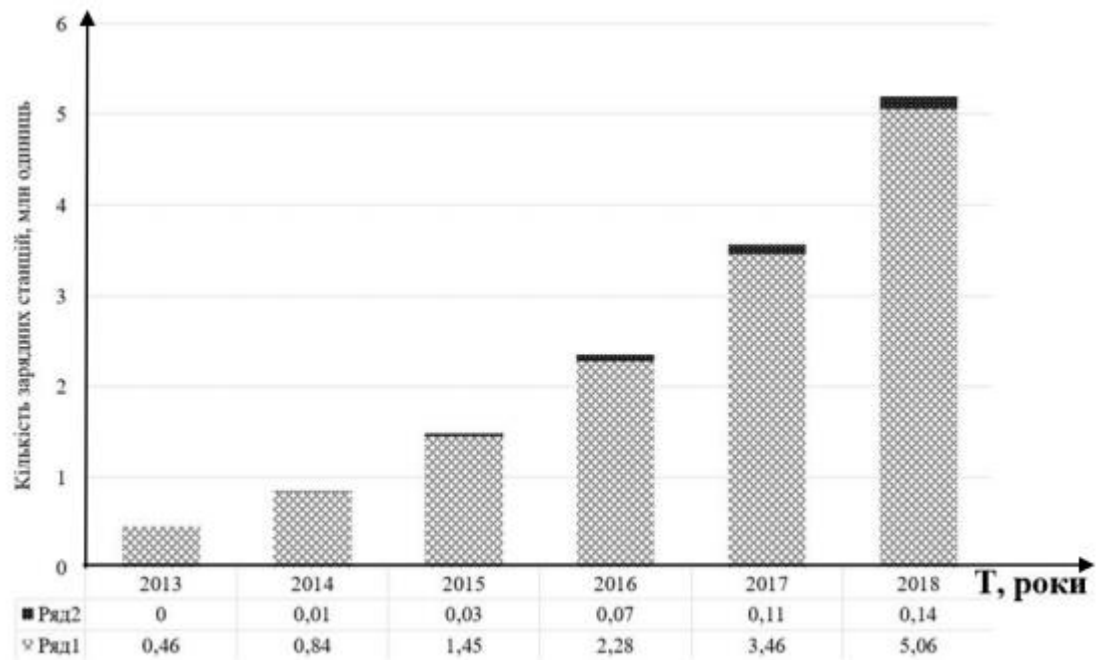


Рисунок 1.4 – Динаміка приросту зарядних станцій в світі з 2013р. по 2018р.

Слід відмітити, що промисловий розвиток станцій швидкого зарядження розпочався не так давно, а саме з 2013 року, коли ринкова кількість електромобілів перевищила півмільйона одиниць і постало питання їх швидкого зарядження не тільки в містах, а й на дорогах міжнародного значення, автобанах, магістралях і т.д.

Розвиток відновлюваної енергетики та електротранспорту в Україні має схожий характер в порівнянні із загальносвітовою тенденцією, однак початок їх розвитку відбувся дещо пізніше, що пояснюється економічною та суспільно-політичною ситуацією в країні. Тим не менш, на кінець 2018 року сумарна встановлена потужність всіх об'єктів відновлюваної енергетики в Україні згідно [8] склала 2117 МВт (рис.1.2).

Динаміку розвитку ринку електромобілів складно проаналізувати, оскільки відсутні офіційні дані з 2010 року, однак згідно [4] за 2014 рік в Україну було ввезено 95 електромобілів, в 2015 році – 731, в 2016 року – 1709, в 2017 року – 4406, в 2018 року – 9706 одиниць (рис. 1.4). Такий приріст пояснюється прийнятим Законом «Про внесення змін до Закону «Про митний тариф України» щодо ввізного мита на електромобілі». Закон України № 822-VIII, який був підтриманий Верховною Радою 25 листопада 2015 року, встановлює нульову ставку ввізного мита на автомобілі, оснащені електродвигуном.

Враховуючи швидкі темпи приросту об'єктів відновлюваної енергетики з однієї сторони та не менш стрімкий розвиток приросту електромобілів з іншої, на сьогоднішній день стає актуальним питання розвитку інфраструктури зарядних станцій, які зможуть заряджати акумуляторні батареї від установок на основі відновлюваних джерел енергії як класичними, так і новими методами «швидкого» заряду [9].

Темпи розвитку ринку електромобілів залежать від рівня розвитку акумуляторних батарей, які є базовим компонентом електромобіля. В залежності від типу електрохімічної системи та її енергоемності визначаються технічні характеристики електромобілів.



## 1.2. Існуючий досвід впровадження зарядних станцій на основі фотопанелей

Перша зарядна станція електромобілів на основі ВДЕ [9] була встановлена на критій автостоянці з інтегрованими в дах фотоелектричними батареями встановленою потужністю 20 кВт (рис.1.5). Дана зарядна станція дозволяє проводити заряд як гібридних, так і повністю електричних транспортних засобів класичним методом зарядження.



Рисунок 1.5 – Стоянка з фотоелектричною зарядною станцією

Ще одним прикладом фотоелектричної зарядної станції на 50 кВт (рис.1.8) для електротранспорту є проект, реалізований в 2011 році в США (штат Айова), що дозволяє заряджати транспортні засоби різних брендів, зокрема EXV-2, GEM, Chevy Volt та Toyota Prius [80].



Рисунок 1.6 – Стоянка з фотоелектричною зарядною станцією біля University Services Building (США).

Компанія Envision solar [8] випускає та реалізує зарядні станції на основі фотоелектричних батарей потужністю 3,4 кВт та 4,1 кВт. В складі зарядних станцій використовують буферний акумулятор, що дозволяє реалізовувати заряд електромобіля не лише в світлу пору доби, але й вночі або у випадку відключення електроживлення в централізованій електромережі.

Недоліком таких станцій є відсутність швидкого заряду електромобілів, що пояснюється невеликою потужністю даних зарядних станцій.

Компанія Innoventum (Швеція) в 2014 році на виставці Business of Design Week в Гонконзі (Китай) представила власну розробку Giraffe 2.0 (рис.1.7), яка представляє собою комплексну фото-вітроелектричну зарядну станцію електромобілів [82].



Рисунок 1.7 – Розробка Компанії Innoventum (Швеція) фото-вітроелектрична зарядна станція автомобілів Giraffe 2.0

Для опори вітроустановки висотою 12 м використані матеріали з дерева, а фотоелектрична система, що складається з 24 фотопанелей, виконана у формі навісу для зарядки двох електромобілів. Згідно даних заявника, дана система дозволяє виробляти від 10000 кВт/год до 20000кВт/год електроенергії на рік в залежності від швидкості вітру та рівня сонячної радіації. Спеціальне позиціонування фотоелектричних панелей дає стабільне виробництво енергії на чотири години довше в порівнянні з класичним монтажем фотостанцій.

### **1.3 Сфери використання фото панелей. переваги та недоліки ФП як ВП**

Загалом видобуток енергії з альтернативних джерел стає все популярнішим в Україні та світі. Встановлення сонячних панелей — один із найперспективніших та найекологічніших методів.

Вперше цей вид енергії використали в кінці XIX століття у США – сонячна батарея живила американський супутник «Венгард». Нині ж світовим лідером з використання таких установок є Китай, де сонячні колекторні нагрівачі займають 80% ринку. Що ж до України, то в Криму діє найбільша сонячна електростанція (СЕС) у Європі. Так, станом на січень 2012 року, кримська СЕС «Перово» була найпотужнішою сонячною електростанцією такого типу у світі. До цього моменту перше місце за потужністю займала канадська сонячна електростанція «Sarnia» (97 МВт), друге – італійська Montalto di Castro (84,2 МВт), а третє – німецька Finsterwalde (80,7 МВт).

Станом же на січень 2015 року, в Україні діяло 98 СЕС, загальною встановленою потужністю 819 МВт, якими у 2014 році вироблено 485 млн кВт\*год електричної енергії. Тобто, Україна має великі перспективи у видобуванні енергії з альтернативних джерел. Слід також зазначити, що Україна є одним із найбільших у Європі виробником сонячних батарей та компонентів до них. Щоправда, вони є дорожчими за імпортні аналоги.

Якщо раніше люди використовували енергію сонця максимум для побутових потреб, то зараз сонячні панелі знаходять своє застосування в різноманітні сфер, наприклад:

- в аграрному господарстві, в цілях електрозабезпечення, опалення теплиць, ангарів та інших споруд;
- для електропостачання спортивних об'єктів і медичних установ;
- у сфері авіаційної та космічної промисловості;
- в освітленні вулиць, парків, а також інших міських об'єктів;
- для опалення, електропостачання і гарячого водопостачання житлових будинків.

У сучасній архітектурі все частіше починають будувати будинки з одразу влаштованими акумуляторними джерелами сонячної енергії, тобто сонячними панелями.

Варто зазначити, що сонячна енергетика також відіграє дуже важливу роль в космонавтиці та військовій справі: за допомогою фотоелементів забезпечується постачання енергії на супутники, різноманітні мобільні станції, тощо. Загалом область застосування доволі широка та постійно розширюється.

Щодо переваг, то найбільша перевага використання сонячної енергії – її окупність, бо навіть взимку на вулиці сяють сонячні промені, які зможуть виробити хоча б мінімальну кількість необхідної енергії. До того ж, дійсно великий термін експлуатації, внаслідок цього окупність дійсно бездоганна. Якщо розділити вартість встановлення фотоелементів на кількість років, які вони можуть простояти, економія стає відчутною.

Автономна сонячна батарея може виробляти достатню кількість енергії, аби задовольнити побутові потреби. Крім того, батарея забезпечує повну незалежність енергосистеми у майбутньому. Також встановлення колекторів не потребує ретельного догляду: лише періодична чистка. До того ж, не потрібно платити за рахунками, а вкладені гроші окупляться приблизно через 5 років.

Ще одна перевага сонячних систем у тому, що вони є легко масштабованими. Тобто, можна придбати невеличку установку з декількома панелями, а вже згодом докупити ще. Тому, при обмеженості бюджету, перехід на сонячну енергію, хоч і частковий, але можливий. Якихось негативних моментів, пов'язаних з використанням сонячних батарей у приватних будинках, практично не відзначається.

Недоліків у сонячних панелей мало, але для когось вони можуть здатися дуже вагомими. Не варто забувати, що переваг у сонячних панелей значно більше, і при правильних розрахунках і установці уникнути деяких негативних моментів досить просто.

Основним недоліком є те, що при використанні сонячних панелей для автономного живлення доведеться ретельно подумати, наприклад, про акумулятори. Потрібно або економити і ставити звичайні кадмієві батареї, які доведеться міняти відносно швидко, або вкладатися у літій-іонні і отримати довгий термін експлуатації. Також слід зазначити, що на ефективність роботи фотоелементів впливає велика кількість опадів, зокрема, снігу. Фотоенергетичне обладнання може достатньо ефективно експлуатуватися протягом всього року, але максимально ефективним є протягом 7 місяців на рік (з квітня по жовтень). Наприклад, нікель-кадмієві акумулятори негативно реагують на перепади температур. Охолодження акумулятора більше ніж до 0 °C призводить до втрати потужності. Крім того, слід мати на увазі, що енергія виробляється лише протягом світлового дня, тому для ефективного використання сонячних батарей необхідно подбати про засоби перетворення та накопичення струму.

Попри все, експерти вбачають великі перспективи у розвитку альтернативних джерел енергії та їх впровадження у нові сфери.

## 2 ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ЕЛЕКТРИЧНУ

### 2.1 Фотоелектричний вимірювальний перетворювач

Фотоелектричний перетворювач — це електронний прилад, який перетворює енергію фотонів в електричну енергію. Перший фотоелемент, заснований на зовнішньому фотоелекті, створив Олександр Столетов.

Фотоелектричний (або фотовольтаїчний) метод перетворення сонячної енергії в електричну є в даний час найбільш розробленим в науковому та практичному плані. Вперше на перспективу його використання у великомасштабній енергетиці звернув увагу ще в 30-ті роки один із засновників радянської фізичної школи академік А. Ф. Іоффе. Однак у той час ККД сонячних елементів не перевищував 1%.

На 1 м<sup>2</sup> поверхні Землі, розташованої перпендикулярно сонячним променям, доводиться 1,4 кВт сонячного випромінювання, а на 1 м<sup>2</sup> поверхні Землі (сфери Землі) припадає в середньому 0,35 кВт.

Слід, однак, мати на увазі, що більше половини енергії сонячної радіації не доходить безпосередньо до поверхні Землі (суші і океану), а відображається атмосферою. Вважається, що на 1 м<sup>2</sup> суші і океану землі припадає в середньому близько 0,16 кВт сонячної радіації. Отже, для всієї поверхні Землі сонячне випромінювання становить величину, близьку до 105 млрд. кВт. Ця цифра, ймовірно, у багато тисяч разів перевищує не тільки сьогоденню, але і перспективну потребу людства в енергії.

ФЕП широко використовуються для живлення магістральних систем електропостачання і різноманітного обладнання; вони призначені також для підзарядки бортових хімічних акумуляторних батарей. Крім того, ФЕП знаходять застосування на наземних стаціонарних і пересувних об'єктах, наприклад, в електромобілях.

Темпи зростання і плани розвитку наземної сонячної енергетики, намічені промислово розвиненими країнами, вражають масштабністю. До 2031 року в світі планується мати сукупну встановлену потужність електрогенераторів на сонячній енергії 1700 ГВт (для порівняння: у 2004 р. 1256 МВт). Якщо сьогодні фотовольтаїка займає невеликий відсоток в загальносвітовому балансі виробленої електроенергії, то до 2040 р. ця частка повинна зрости у декілька разів як мінімум.

Є проекти по створенню фотоелектричних сонячних електростанцій, розвиваються технології виробництва різноманітних сонячних панелей. Широке впровадження сонячної енергетики в космосі і на землі ставить перед проектувальниками проблему оцінки ефективності роботи фотоелектричних систем (ФЕС). Необхідно мати можливість передбачити потужність сонячних батарей під дією різноманітних факторів навколишнього середовища, порівняти ефективність використання сонячних батарей (СБ) з різних матеріалів, оцінити поведінку фотоелектричних перетворювачів в різних режимах роботи. Для ефективного використання фотоелектричних генераторів необхідно знати точку максимальної потужності і забезпечити такий режим, щоб отримувана потужність при зміні навколишніх умов була найбільшою. При тестуванні ФЕС використовують імітатори сонячних батарей, що дозволяють відтворювати їхні характеристики під впливом різноманітних зовнішніх впливів.

Передбачення поведінки і відтворення характеристик сонячних батарей здійснюється за допомогою моделювання. У порівнянні з експериментом, математичне моделювання надає більш швидкий, гнучкий і дешевий спосіб тестувати ФЕС. Для відтворення характеристик СБ найчастіше використовуються аналітичні моделі, які будуються на базі еквівалентної електричної схеми та основного рівняння перетворення. Роботи з моделювання характеристик СБ активно ведуться закордоном, результати досліджень розглядаються на регулярних конференціях з фотовольтаїки.



Відомі аналітичні моделі дозволяють відтворювати зміни вихідних характеристик сонячних батарей під дією різних температур і рівнів освітленості, але не враховують інших значущих чинників. Не приймаються до уваги неідеальність СБ, конструктивні особливості батарей, необхідність відтворення їх характеристик з різних матеріалів.

Разом з тим, для використання пропонованих моделей потрібне проведення додаткових експериментів, що дозволяють визначити їх вхідні параметри.

Також можна відмітити плюси фотоелектричних перетворювачів:

- довгий термін служби;
- достатня апаратна надійність;
- відсутність витрат активної речовини або палива.

Недоліки:

- необхідність орієнтування пристроїв на сонце;
- відносно великі площі опромінюваних поверхонь;
- для ефективної роботи температура елементів повинна дорівнювати  $+25^{\circ}\text{C}$ ;
- непрацездатність за відсутності освітлення.

Найпростіша конструкція фотоелектричного перетворювача —приладу для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричнупоказана на рис. 2.1.

На малій глибині від поверхні кремнієвої пластини р сформований р-n-перехід з тонким металевим контактом. На тильну сторону пластини нанесено суцільний металевий контакт. Коли ФЕП освітлюється, поглинені фотони генерують нерівноважні електрон-діркові пари. Електрони, що генеруються в р-шарі поблизу р-n-переходу, підходять до р-n-переходу та існуючим в ньому електричним полем виносяться в n-область.

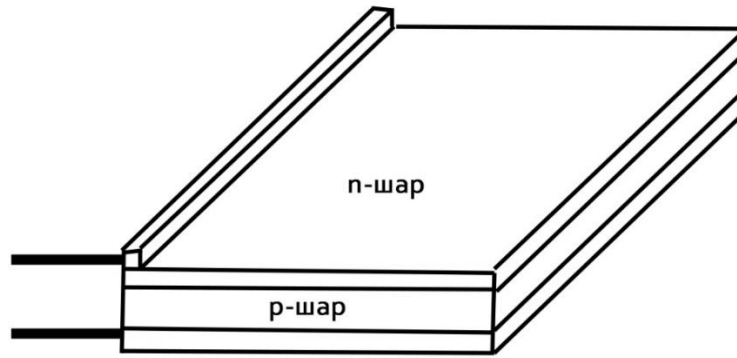


Рисунок 2.1 – Конструкція сонячного елемента

Аналогічно і надлишкові дірки, створені в n-шарі, частково переносяться в р-шар (рис. 2.2).

У результаті n-шар набуває додаткового негативного заряду, а р-шар — позитивного.

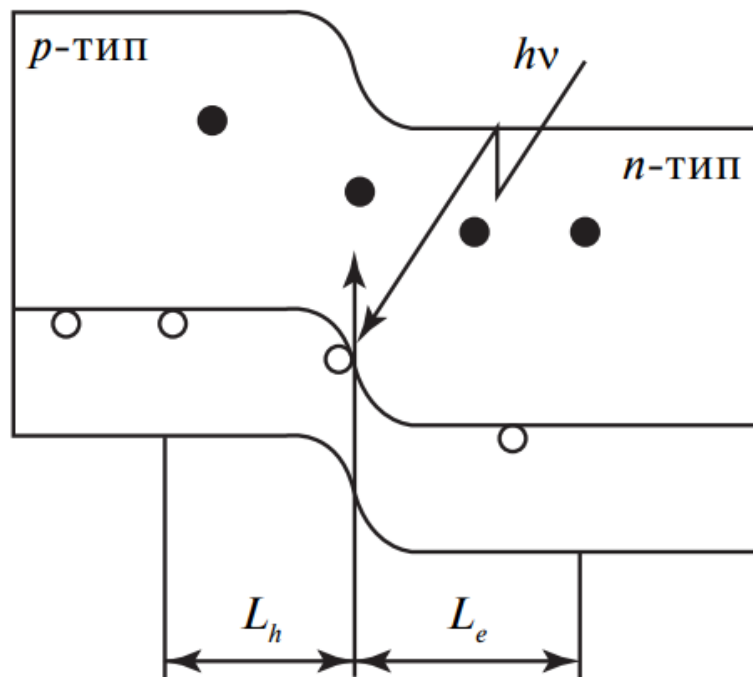


Рисунок 2.2 – Зонна модель розімкнутого р-п-переходу в початковий момент освітлення

Знижується первісна контактна різниця потенціалів між р- та n-шарами напівпровідника, і в зовнішньому ланцюзі з'являється напруга (рис. 2.3).

Негативному полюсу джерела струму відповідає n-шар, а р-шару - позитивному.

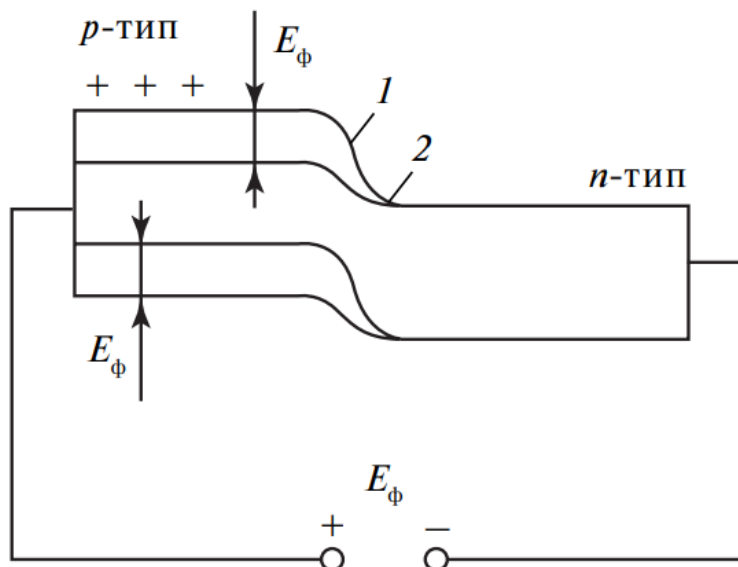


Рисунок 2.3 – Зонна модель розімкнутого р-n-переходу: зміна зонної моделі під дією постійного освітлення і виникнення фото ЕРС

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;
- сонячний елемент повинен володіти значною висотою бар'єру в напівпровідниковому переході;
- повний опір, включений послідовно з сонячним елементом (виключаючи опір навантаження), повинен бути малим для того, щоб зменшити втрати потужності (тепло джоуля) 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.

Також одним із недоліків є оптичні втрати фотоелектричних перетворювачів. Причинами оптичних втрат в сонячних елементах є відбиття частини сонячного випромінювання від поверхні ФЕП і затінення із контактною сіткою. Зниження коефіцієнта відбиття  $R$  досягається нанесенням на поверхню ФЕП просвітлюючих покриттів у вигляді тонких плівок, що забезпечують інтерференцію і взаємне гасіння світлових хвиль, відбитих від поверхні плівки і від кордону плівка-напівпровідник. Інтегральний коефіцієнт відбиття, таким чином, може бути зменшений від  $R \approx 35\%$  для непросвітленої поверхні до  $R \approx 10\%$  при використанні одношарових просвітлюючих покриттів. Створення текстурованої фронтальної поверхні, освіченою, наприклад, регулярно розташованими пірамідами, забезпечує зниження коефіцієнта відбиття до  $\sim 20\%$  для непросвітленої поверхні і до декількох відсотків при використанні одношарових покриттів.

Для гладкої поверхні ФЕП (непросвітленої або просвітленої) коефіцієнт відбиття майже не змінюється при збільшенні кута падіння світлових променів до  $30-40^\circ$ , проте потім швидко збільшується, прагнучи до одиниці при кутах падіння, близьких до  $90^\circ$ . При використанні концентраторів випромінювання, що створюють в фокальній площині зображення Сонця (лінзи, сферичні дзеркала), кути падіння променів, як правило, не перевершують  $30-40^\circ$ . Однак при використанні деяких типів концентраторів (фокони, фокліни) кут падіння частини променів може досягати значень, близьких до  $90^\circ$ . Текстурування як поверхні напівпровідника, так і поверхні захисного скла дозволяє значно знизити кутову залежність коефіцієнта відбиття і, отже, зменшити інтегральний коефіцієнт відбиття концентрованого сонячного випромінювання.

Другу частину оптичних втрат в ФЕП становлять втрати на затінення світлочутливої поверхні електричним контактом до освітлюваної області р-n-переходу. Для зниження омичних втрат контакт зазвичай виконується у вигляді металевої сітки з кроком від декількох міліметрів (для перетворення

слабоконцентрованого випромінювання) до 0.1-0.3 мм (для перетворення сильноконцентрованого випромінювання). При цьому втрати на затінення можуть становити від декількох відсотків до 10-20%.

У конструкції ФЕП, зображеного на рис. 2.4, для зниження втрат на відбиття світла від контактів сонячний елемент виконаний з гофрованої фронтальної поверхні при глибині рельєфу 5мкм. Контактні смуги мають ширину, порівнянну з глибиною рельєфу, що при розташуванні контактних смуг під кутом до напрямку гофрування забезпечує попадання частини світла в фотоактивних (вільну від контактів) область структури після відбиття цього світла від контактних смуг. Сонячні фотоелементи даного типу виготовлялися на основі структури n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>-типу. В якості вихідного матеріалу використовувався легований бором кремній з низьким питомим опором (0.1-0.2 Ом·см) і високим часом життя неосновних носіїв струму.

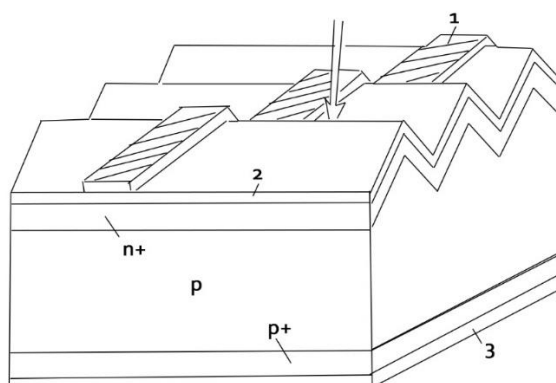


Рисунок 2.4 – Схематичне зображення n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>-кремнієвого ФЕП з гофрованою фронтальною поверхню:1 - контактна смуга на рельєфній поверхні;2 - «покриття, що просвітлює»;3 - тильний контакт

Для зниження втрат розглянутого типу були розроблені спеціальні конструкції перетворювачів концентрованого сонячного випромінювання. У ФЕП, показаному на рис. 2.5, контакти обох полярностей виведені на тильну поверхню.

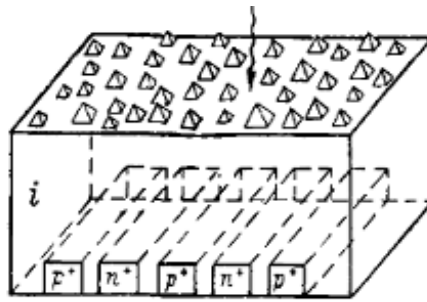


Рисунок 2.5 – Схематичне зображення конструкцій ФЕП

В іншому варіанті (рис. 2.6) поверхня ФЕП виконана рельєфною і контактні смужки розташовуються на площинах, паралельних ходу світлових променів, що значно знижує коефіцієнт затінення контактами.

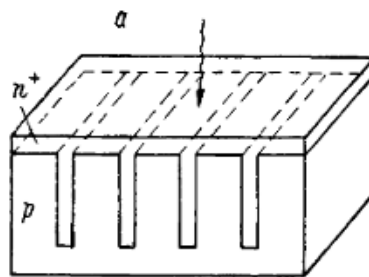


Рисунок 2.6 – Схематичне зображення конструкцій ФЕП з вертикальними р-п -переходами

У варіанті на рис. 1.6 контакти на рельєфній поверхні розташовуються таким чином, щоб відбиті від них промені потрапляли на фотоактивних поверхню ФЕП.

Враховуючи те, що для ефективної роботи ФЕП температура елементів повинна дорівнювати  $+25^{\circ}\text{C}$ , то для покращення характеристик данного перетворювача можна використати елемент Пельтьє.

Елемент Пельтьє — це термоелектричний перетворювач, принцип дії якого базується на ефекті Пельтьє — виникненні різниці температур при протіканні електричного струму. Він буде підтримувати оптимальну температуру сонячного ВП, а відповідно, оптимальна температура сприятиме покращенню характеристик ВП.

Перевагою елемента Пельтьє є невеликі розміри, відсутність будь-яких рухомих частин, а також газів і рідин. При зверненні напрямку струму можливо як охолодження, так і нагрівання — це дає можливість термостатування при температурі навколишнього середовища як вище, так і нижче температури термостатування.

## 2.2 Рівняння та графік перетворення

Ефективність фотоелектричного перетворювача визначається світловою вольт-амперною характеристикою (ВАХ) сонячного елемента (СЕ), форма якої залежить від ряду параметрів: послідовного і паралельного (шунтуючого) опорів, щільності струму насичення діода, діодного коефіцієнту та деяких інших параметрів. У зв'язку з цим суттєве значення має задача контролю та оптимізації цих параметрів при виробництві сонячних батарей. У випадку сонячного ВП ця характеристика розглядається при наявності додаткових умов, які у світовій практиці були стандартизовані і застосовуються зараз при проектуванні всіх подібних систем у всьому світі. Відповідно цим стандартам ВАХ сонячних елементів визначається при потужності випромінювання сонця, яка дорівнює 1000 Вт на один квадратний метр. При цьому температура елементів повинна дорівнювати +25°C.

Світлова ВАХ сонячного елемента демонструє залежність вихідного струму, що генерується при освітленості СЕ та протікає через підімкнене навантаження, від падіння напруги на цьому навантаженні. Рівняння, що описує світлову ВАХ СЕ можна представити в наступному вигляді:

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{U+IR_S}{m}\right) - 1 \right) - \frac{U+IR_S}{R_p}, \quad (2.1)$$

де  $m = AkT/e$ ,  $I$  — величина струму протікаючого через навантаження,  $U$  — падіння напруги на навантаженні,  $I_{ph}$  — величина генеруемого

фотоструму,  $I_0$  — величина струму насичення діоду,  $A$  — діодний коефіцієнт,  $e$  — модуль заряду електрона,  $k$  — стала Больцмана,  $T$  — термодинамічна температура,  $R_p$  — паралельний (шунтуючий) опір,  $R_s$  — послідовний опір.

Рівняння (1) описує ВАХ реального СЕ, але якщо не враховувати останній доданок, то рівняння буде описувати ВАХ ідеального сонячного елемента.

На рисунку 2.7 представлена ВАХ сонячного елемента, яка являється дуже важливою характеристикою СЕ оскільки визначає ефективність перетворення енергії сонячного випромінювання в електроенергію.

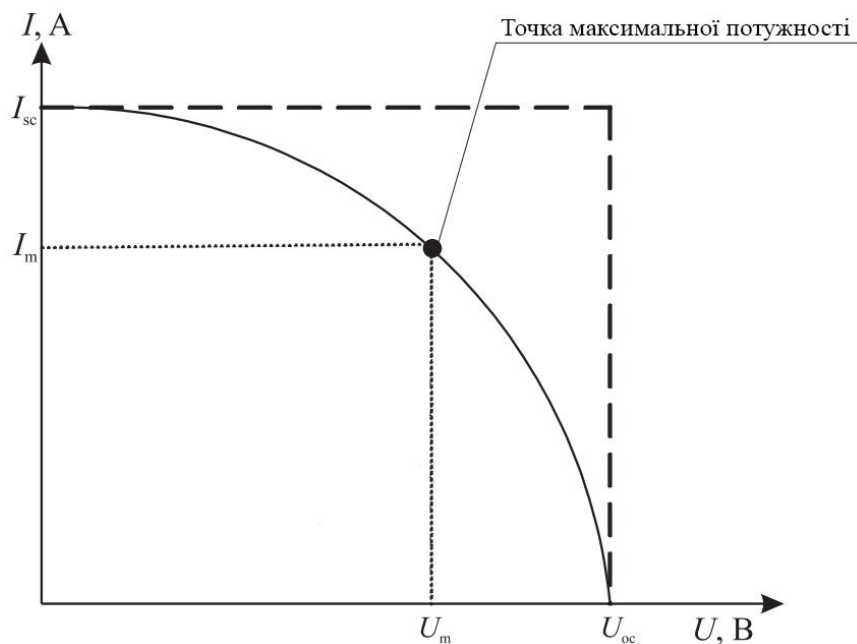


Рисунок 2.7 — ВАХ сонячного елемента:  $I_{sc}$  — струм короткого замикання;  $U_{oc}$  — напруга холостого ходу

Залежність ВАХ СЕ від його параметрів зображена на рисунку 2.8.



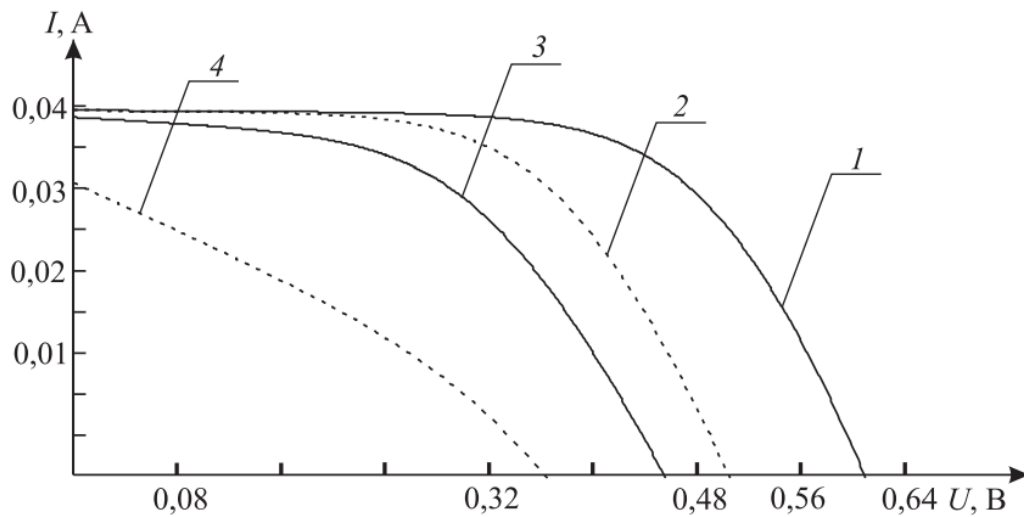


Рисунок 2.8 – ВАХ СЕ при різних значеннях параметрів

Значення параметрів на рисунку 2.8:

1 —  $I_0 = 0,22 \text{ мкА}$ ,  $R_S = 1,7 \text{ Ом}$ ,  $R_p = 1,2 \text{ кОм}$ ,  $A = 1,9$ ;

2 —  $I_0 = 1 \text{ мкА}$ ,  $R_S = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_p = 1,2 \text{ кОм}$ ,  $A = 1,8$ ;

3 —  $I_0 = 1,5 \text{ мкА}$ ,  $R_S = 2,5 \text{ Ом}$ ,  $R_p = 120 \text{ Ом}$ ,  $A = 1,7$ ;

4 —  $I_0 = 2 \text{ мкА}$ ,  $R_S = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_p = 12 \text{ Ом}$ ,  $A = 1,6$

Основним математичним параметром (характеристикою) сонячного ВП є ККД конкретного елемента. Данне ККД можна розрахувати за формулою (2):

$$\eta = \frac{P_m}{P} = \frac{ff \cdot I_{sc} \cdot U_{oc}}{P}, \quad (2.2)$$

де  $P$  — потужність падаючого на СЕ випромінювання,  $P_m$  — максимальна вихідна потужність СЕ,  $ff$  — фактор заповнення ВАХ,  $I_{sc}$  — струм короткого замикання,  $U_{oc}$  — напруга холостого ходу.

Фактор (коефіцієнт) заповнення ВАХ в свою чергу обчислюється за формулою (3):

$$ff = \frac{I_m U_m}{I_{sc} U_{sc}}, \quad (2.3)$$

де  $I_m$  та  $U_m$  — величина струму і напруги, відповідаючі точці найбільшої потужності  $P_m$  (див. рис. 2.7).

Саме рівняння перетворення для СЕ наведено у формулі (4):

$$P_m = ff * I_{sc} * U_{oc} \quad (2.4)$$

Графік перетворення представлено на рисунку 2.9.

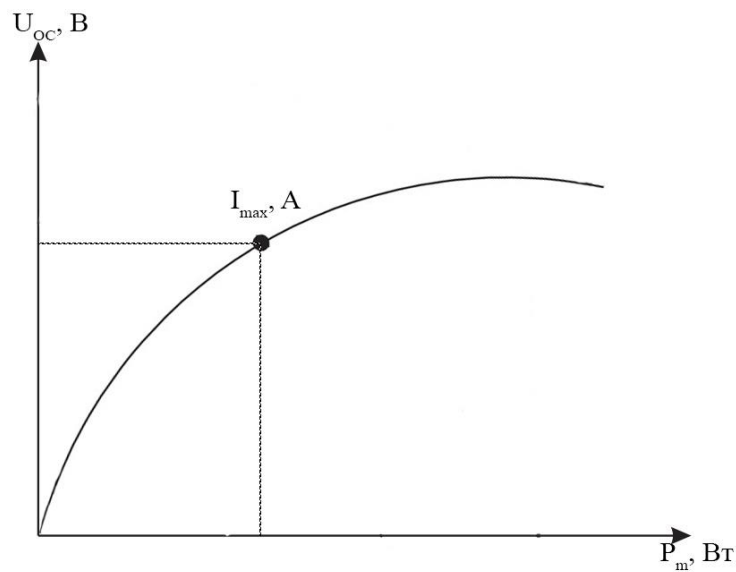


Рисунок 2.9 – Графік перетворення сонячного елемента

В силу того, що ККД сонячного елемента залежить від форми його ВАХ, параметри СЕ, що входять в рівняння ВАХ визначають ефективність СЕ. Побудова ВАХ у відповідності з рівнянням (1) при різних значеннях параметрів СЕ демонструє те, що її форма суттєво залежить від цих параметрів, точні значення яких необхідні для прогнозування роботи самого приладу. Тому при розробці і виготовленні сонячного елемента необхідно використовувати методики достовірного визначення їх параметрів.

Розглянемо параметри та метрологічні характеристики сонячного елемента з використанням розкладу рівняння вольт-амперної характеристики в ряд Тейлора та виконаємо розрахунок параметрів СЕ за допомогою значень площ під ВАХ.

Вираз для площі під кривою ВАХ $P_{IV}$  та площі під графіком потужності  $CE P_p$  мають вигляд:

$$P_{IV} = \int_0^{U_{oc}} I(U) dU, \quad P_p = \int_0^{U_{oc}} I(U) U dU, \quad (2.5)$$

де криві ВАХ  $I(U)$  задаються рівнянням (1). Для знаходження інтегралів (5) в символній формі спростимо підінтегральні вирази шляхом апроксимації ВАХ розкладом в ряд Тейлора в околі деякої точки  $U^*$ , обмежившись членом ряду, що містить другу похідну. Тоді

$$I(U) = a - b(U - U^*) - c(U - U^*)^2, \quad (2.6)$$

де  $a, b, c$  визначаються наступними виразами:

$$a = I_{sc} - I_0 \left( \exp\left(\frac{U^* + I^* R_s}{m}\right) - 1 \right) - \frac{U^* + I^* R_s}{R_p},$$

$$b = \frac{I_0 * \exp\left(\frac{U^* + I^* R_s}{m}\right) + \frac{m}{R_p}}{m \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right) + I_0 R_s * \exp\left(\frac{U^* + I^* R_s}{m}\right)},$$

$$c = \frac{1}{2} \frac{I_0 m * \exp\left(\frac{U^* + I^* R_s}{m}\right)}{\left(m \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right) + I_0 R_s * \exp\left(\frac{U^* + I^* R_s}{m}\right)\right)^3},$$

де  $I^*$  — значення сили струму, що відповідає напрузі  $U^*$ .

Розіб'ємо ВАХ сонячного елемента на деякі інтервали, що позначені на рисунку 2.10:

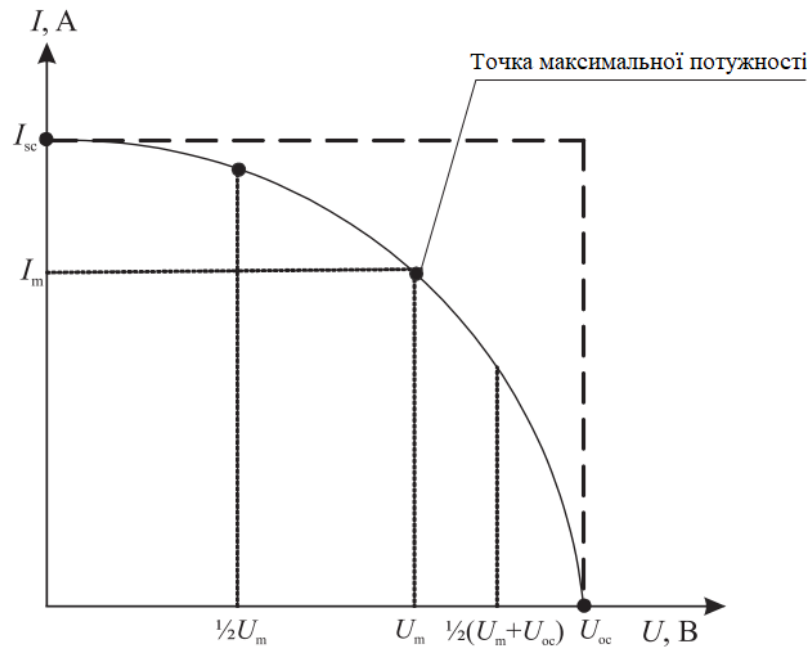


Рисунок 2.10 – Розбивка ВАХ СЕ на інтервали

Апроксимуємо залежність сили струму, що описано рівнянням (1), від напруги на кожному із отриманих інтервалів розкладом в ряд Тейлора (6) в околі точок  $U = 0; 0.5U_m; U_m; U_{oc}$ . Розрахунок інтегралів (5) на кожному із заданих інтервалів, виходячи з отриманих апроксимацій  $I(U)$ , дає систему рівнянь, розв'язок якої при виконанні відомих умов для реальних СЕ

$$I_0 \ll I_{sc}, \quad I_{ph} \approx I_{sc}, \quad \frac{R_S}{R_P} + 1 \approx 1$$

дає наступні вирази для розрахунку їх параметрів:

$$R_S = \frac{1}{I_m} \left( \frac{I_{sc}}{s_2} - \frac{I_{sc} - I_m}{s_1} \right), \quad (2.7)$$

$$A = \frac{e}{kT} \left( \frac{I_{sc}}{s_2} - R_S I_{sc} \right), \quad (2.8)$$

$$I_0 = I_m - I_{sc} - \frac{s_1 m}{s_1 R_S - 1}. \quad (2.9)$$

Параметри  $s_1$  та  $s_2$  визначаються значеннями площ під апроксимованими кривими ВАХ  $P_{IV}^{(1)}$ ,  $P_{IV}^{(2)}$  і графіками потужності  $P_P^{(1)}$ ,  $P_P^{(2)}$  на відповідних інтервалах (обчислюються з використанням математичного пакету MathCad):

$$s_1 = \frac{P_{IV}^{(1)} t_3 - P_P^{(1)} y_3 - y_1 t_3 + t_1 y_3}{t_2 y_3 + y_2 t_3}, \quad s_2 = \frac{P_{IV}^{(2)} t_5 - P_P^{(2)} y_3}{t_4 y_3 + y_2 t_5}, \quad (2.10)$$

де

$$y_1 = \frac{1}{2} I_m (U_{oc} - U_m),$$

$$y_2 = \frac{1}{8} (U_{oc} - U_m)^2,$$

$$y_3 = \frac{1}{24} (U_{oc} - U_m)^3,$$

$$t_1 = \frac{1}{8} I_m (U_{oc} - U_m) (U_{oc} + 3U_m),$$

$$t_2 = \frac{1}{24} (U_{oc}^3 - 3U_m^2 U_{oc} + 2U_m^3),$$

$$t_3 = -\frac{1}{4} \left( \left( \frac{U_{oc} + U_m}{2} \right)^4 - U_m^4 \right) - \frac{2}{3} U_{oc} \left( \left( \frac{U_{oc} + U_m}{2} \right)^3 - U_m^3 \right) + \frac{1}{2} U_{oc}^2 \left( \left( \frac{U_{oc} + U_m}{2} \right)^2 - U_m^2 \right),$$

$$t_4 = -\frac{1}{24} (2U_{oc}^3 - 3U_m U_{oc}^2 + U_m^3),$$

$$t_5 = -\frac{1}{4} \left( \left( \frac{U_{oc} + U_m}{2} \right)^4 - U_{oc}^4 \right) + \frac{2}{3} U_{oc} \left( \left( \frac{U_{oc} + U_m}{2} \right)^3 - U_{oc}^3 \right) - \frac{1}{2} U_{oc}^2 \left( \left( \frac{U_{oc} + U_m}{2} \right)^2 - U_{oc}^2 \right),$$

$$P_{IV}^{(1)} = \int_{U_m}^{\frac{U_m+U_{OC}}{2}} I(U)dU, P_{IV}^{(2)} = \int_{\frac{U_m+U_{OC}}{2}}^{U_{OC}} I(U)dU,$$

$$P_P^{(1)} = \int_{U_m}^{\frac{U_m+U_{OC}}{2}} I(U)UdU, P_P^{(2)} = \int_{\frac{U_m+U_{OC}}{2}}^{U_{OC}} I(U)UdU.$$

Для подібної задачі та необхідних аналітичних розрахунків вистачить першого та другого порядку розкладу, тобто  $y_1, y_2, t_1, t_2$ . Далі розрахуємо метрологічні характеристики ВП. Для їх визначення ми використаємо наступні параметри СЕ:

$$I_m = 0.035 \text{ A};$$

$$U_m = 0.44 \text{ В};$$

$$U_{OC} = 0.6 \text{ В};$$

ВАХ СЕ при заданих параметрах можна розглянути на рисунку 2.2.

Підставивши данні значення у вирази  $y_1, y_2, t_1, t_2$ , отримаємо:

$$y_1 = 0.0028 \text{ — чутливість ВП } (S_0);$$

$$y_2 = 0.0032 \text{ — зміна чутливості ВП } (S_0^*);$$

$$t_1 = 0.00134 \text{ — коефіцієнт впливу впливних факторів } (\beta_0^*);$$

$$t_2 = 0.00158 \text{ — коефіцієнт впливу впливних факторів на номінальну функцію } S_0(\alpha_0).$$

### 3 РОЗРОБКА СТРУКТУРНА ТА ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ЕЛЕКТРИЧНУ

Враховуючи вищезгадану інформацію із 2-го розділу, еквівалентна схема сонячного елемента представляє собою паралельно з'єднані між собою генератор струму та ідеальний діод (рис. 3.1).

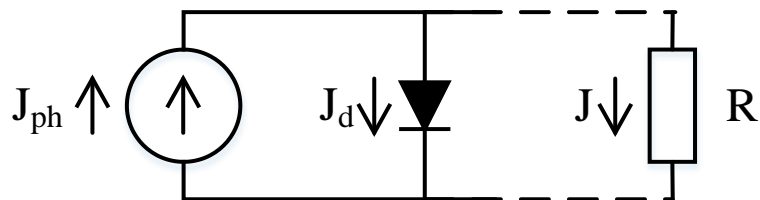


Рисунок 3.1 – Еквівалентна схема ідеального СЕ:  $R$  — опір навантаження

Оскільки сонячний елемент — прилад силовий, тобто передбачений для роботи з досить високими густинами струму, то як наслідок він має високі падіння різниці потенціалів навіть на досить малих опорах. Отже, виникає необхідність врахування паралельного опору СЕ  $R_p$  та послідовного опору  $R_s$ .  $R_p$  — це опір витоку; припускається, що в ідеальному СЕ він є нескінченно-великим.

Із врахуванням зроблених зауважень побудована наступна еквівалентна схема реального СЕ (рис. 3.2).

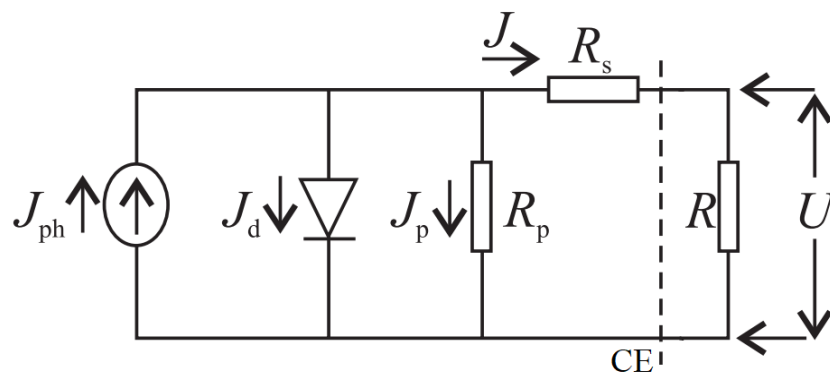


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема розробленого СЕ

Генератор струму моделює виникаючий при освітлені фотострум, а паралельний йому діод враховує інжекційний струм (струм дифузії та тепловий струм). Для реального сонячного елемента послідовний опір  $R_s$  складається із послідовно-ввімкнених опорів контактних шарів, опорів кожної із  $p$ -тап- областей елемента, а також перехідних опорів метал-напівпровідник. Паралельний опір  $R_p$  відображає можливі канали витoku струму, що паралельні  $p$ - $n$ - переходу.

Якщо декілька сонячних елементів з'єднати між собою, буде отримана сонячна панель. В свою чергу сонячні панелі між собою також можна з'єднувати як послідовно, так і паралельно. Схеми послідовного включення сонячних панелей зображена на рисунку 3.4.

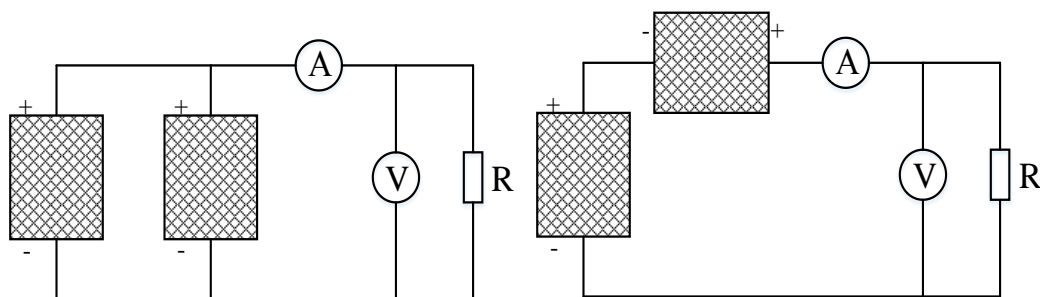


Рисунок 3.4 – Схеми включення сонячних панелей: послідовно (зправа), паралельно (зліва)

Далі розглянемо функціональну схему підключення сонячної панелі (рисунок 3.5).

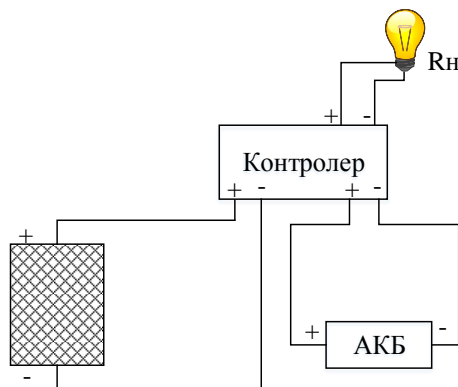


Рисунок 3.5 – Функціональна схема підключення ВП



Контролер необхідний для перетворення змінного струму з сонячної панелі у постійний струм для заряду акумулятора (АКБ). Якщо заряд АКБ достатній, то контролер виконує функцію перетворювача постійного струму з АКБ у змінний струм для  $R_n$  (опір навантаження).

Контролери ще називають інверторами і вони бувають двох видів:

- автономний — для роботи в автономній системі;
- мережевий — для мережевого використання.

Саме перший варіант передбачає наявність в системі акумуляторів, до яких і підключається інвертор. В другому випадку, сонячна панель приєднується безпосередньо до акумулятора.

Варто приділити увагу захисту, а саме від:

- високої і низької напруги акумулятора;
- перевантаження по виходу;
- перегріву;
- короткого замикання по виходу.

Також можна використовувати стабілізатор напруги. Він представляє собою перетворювач електроенергії, який на виході генерує напругу заданого діапазону при значних коливаннях опору навантаження та вхідного опору. Існують різноманітні типи стабілізаторів. Найпростіший — це шунтовий стабілізатор.

## **4 МАТЕМАТИЧНЕ ОПИСАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАРЯДЖЕННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ**

### **4.1. Існуючі теоретичні підходи до математичного описання процесу перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну фотоелектричними установками**

Складність моделювання виробництва електричної енергії фотоелектричною батареєю ЕФЕБ обумовлюється випадковим характером інтенсивності сонячного випромінювання (яке виступає в ролі енергетичного ресурсу), та нелінійним алгоритмом перетворення енергії Сонця в електричну, що вносить додаткову невизначеність через особливості роботи фотоелектричних установок в різних кліматичних умовах та різних рельєфних ландшафтах.

Зважаючи на це актуальною науковою задачею є розроблення математичного опису системи зарядної станції електромобілів ЗСЕМ з використанням фотоелектричних установок (ФЕУ) та буферних акумуляторів енергії для вирівнювання виробітку та споживання електричної енергії. Для вирішення даної задачі необхідно провести аналіз існуючих підходів до моделювання процесу перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію шляхом застосування фотоелектричних установок. При цьому необхідно враховувати специфіку роботи акумуляторних батарей. На основі проведеного аналізу необхідно запропонувати модель роботи зарядної станції електромобілів (ЗСЕМ) на основі ФЕБ.

Інтенсивність сонячного випромінювання, що визначає енергію, яка потрапляє на одиницю площі поверхні за одиницю часу, так само як і енергія вітрового потоку, є випадковою величиною, відповідно виробництво електроенергії фотоелектростанціями має змінний характер.

Описання надходження сонячного випромінювання проводять бета, гама, експоненційним, геометричним та логнормальним розподілами.

Потужність ФЕБ обмежена певною величиною, яка дорівнює номінальній (установленій) потужності  $P_{ФЕБ}$  незалежно від величини інтенсивності сонячного випромінювання. Графічний приклад типової кривої потужності приведено на рис. 4.1.

З однієї сторони, аналіз сімейства вольт-амперних характеристик показує прямо пропорційну залежність струму ФЕБ від інтенсивності сонячної радіації ( $G$ , Вт/м<sup>2</sup>). З іншої сторони, приведені ВАХ показують нелінійність залежностей  $I_{ФЕБ} = f(U)$ , які змінюються залежно від інтенсивності випромінювання і температури. Це в кінцевому результаті визначатиме і нелінійну залежність  $P_{ФЕБ} = f(U)$ , оскільки потужність ФЕБ  $P_{ФЕБ}$ , як джерела електричної енергії, в найпростішому випадку виглядає як добуток:  $P_{ФЕБ} = U_{ФЕБ} \cdot I_{ФЕБ}$ .

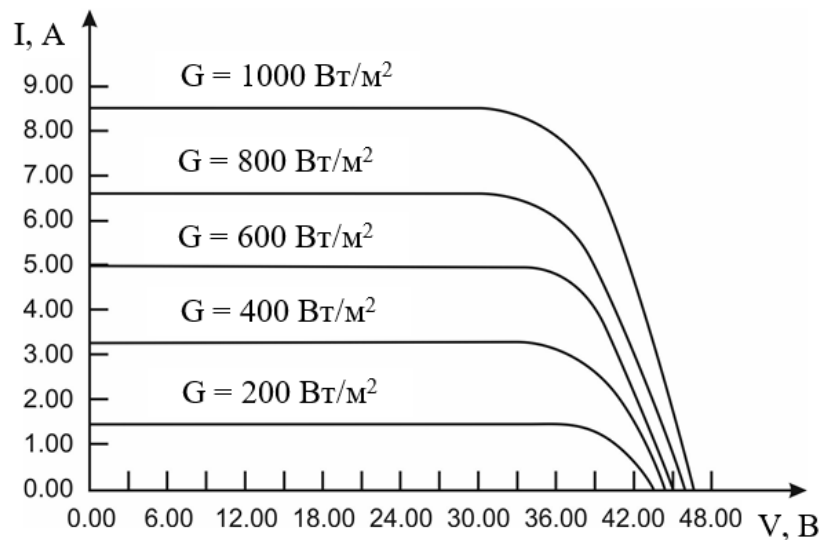


Рисунок 4.1 – Сімейство типових вольт-амперних характеристик фотомодуля в залежності від інтенсивності сонячного випромінювання.

Згідно [38] модель потужності фотобатарей виражається наступним рівнянням:

$$P_{ФЕБ} = \eta_{ФЕБ} \cdot F_{ФЕБ} \cdot G_t = \eta_r \cdot \eta_{psc} \cdot (1 - \beta(T_c - T_{ref})) \cdot A_{ФЕБ} \cdot G_t$$

де:  $F_{ФЕБ}$  – площа фотобатарей, м<sup>2</sup>;

$G$  – відносна інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м<sup>2</sup>;

$$\eta_{\text{ФЕБ}} = \eta_r \cdot \eta_{\text{psc}} \cdot [1 - \beta(T_c - T_{\text{ref}})]$$

- коефіцієнт ефективності;

$\eta_r$  – паспортна ефективність фотомодуля;

$\eta_{\text{psc}}$  – ефективність використання потужності, рівна 1 при досягненні точки максимальної потужності MPPT (Maximum Perfect Power Tracker);

$\beta$  – температурний коефіцієнт ефективності, вважається постійним для конкретного виду напівпровідника (наприклад для кремнієвих фотоелементів  $0,004 \div 0,006 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$T_{\text{ref}}$  – паспортна температура фотоелементів,  $^\circ\text{C}$ ;

$T_c$  – поточна температура фотоелементів,  $^\circ\text{C}$ , яка розраховується наступним чином:

$$T_c = T_a + \left[ \left( \frac{\text{NOCT} - 20}{800} \right) \right] \cdot G_t$$

(4.1)

де:  $T_a$  – температура навколишнього середовища,  $^\circ\text{C}$ ;

$\text{NOCT}$  – номінальна температура роботи фотоелементів,  $^\circ\text{C}$ .

Оскільки параметри  $\eta_{\text{psc}}$ ,  $\beta$ ,  $\text{NOCT}$  та  $\text{ФЕБ}$  залежать від типу фотомодуля та задаються виробником, то незалежними випадковими величинами виступають температура та інтенсивність сонячного випромінювання. Аналіз рівняння (3.1) показує лінійний характер залежності вихідної потужності від інтенсивності сонячного випромінювання.

Згідно роботи [122], визначення вихідної потужності фотоелектричної батареї проводиться наступним чином:

$$P_{\text{ФЕБ}}(t) = P_{\text{ФЕБном}} \cdot k_{\text{зе}} \cdot \frac{\overline{I_\beta(t)}}{I_{\text{су}}} \left[ 1 + \alpha_p (v_{\text{ФЕБ}}(t) - v_{\text{су}}) \right]$$

(4.2)

де:  $P_{\text{ФЕБ}}(t)$  – вихідна потужність ФЕБ, кВт;

$P_{\text{ФЕБном}}$  – номінальна потужність ФЕБ при стандартних умовах, кВт;

$k_{\text{зе}}$  – коефіцієнт зниження ефективності ФЕБ;

$I(t)$  – середнє значення густини потоку сонячного випромінювання, яке потрапляє на поверхню ФЕБ за годинний інтервал, Вт/м<sup>2</sup>;

$I_{СУ}$  – густина потоку сонячного випромінювання, яке потрапляє на поверхню ФЕБ при стандартних умовах, Вт/м<sup>2</sup>;

$\alpha_p$  – температурний коефіцієнт потужності ФЕБ, °С-1 (як правило величина  $\alpha_p$  від’ємна, що означає зменшення ефективності ФЕБ з підвищенням температури);

$U_{ФЕБ}(t)$  – поточна температура ФЕБ, °С;

$U_{СУ}$  – температура ФЕБ при стандартних умовах, °С.

Під стандартними умовами мається на увазі: густина сонячного випромінювання рівна 1000 Вт/м<sup>2</sup>, температура поверхні ФЕБ рівна ФЕБ  $\square = 25$  °С.

До переваг використання моделей (3.1) та (3.3) відносять врахування впливу температури навколишнього середовища, впливу температури фотомодуля, можливість підвищення точності імітаційного моделювання енергоустановок на основі ФЕБ та врахування впливу струму навантаження, хоча, яким чином здійснюється врахування останнього не зрозуміло.

Аналіз літературних джерел [123-124], де вивчалось питання моделювання роботи ФЕБ показав, що найбільш поширеною та простою в реалізації вважається однодіодна схема заміщення фотоелементів. Еквівалентна схема моделі фотоелемента складається з джерела фотоструму ( $I_{ФС}$ ), діода ( $D$ ), резистора ( $R_{Ш}$ ), встановленого паралельно до джерела струму і резистора ( $R_{ПО}$ ), що описує внутрішній опір комірки, а залежність  $I_{ФЕБ} = f(U)$  описується наступним рівнянням:

$$I_{ФЕБ} = I_{ФС} - I_D \left( \exp \left[ \frac{q(U + IR_{ПО})}{k \cdot T \cdot A} \right] - 1 \right) - \frac{(U + IR_{ПО})}{R_{Ш}}, \quad (4.3)$$

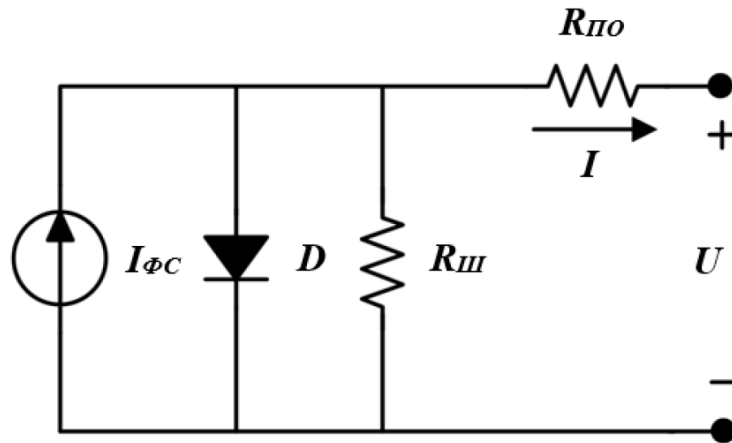


Рисунок 4.2 – Еквівалентна схема однодіодної моделі фотоелемента

На практиці більшого застосування отримала спрощена модель ідеального фотоелемента (в якій послідовний опір  $R_{пo} = 0$ , а шунтуючий опір  $R_{ш} = \infty$ ).

Зважаючи на прийняті умови, математичний опис вихідної потужності фотобатареї можна представити наступним чином:

$$P_{\Phi EB} = U_{\Phi EB} \cdot \left( G [I_{K3} + K_I (T - T_{CT})] - I_D \left( \exp \frac{qU_{\Phi EB}}{k \cdot T \cdot A} \right) - 1 \right), \quad (4.4)$$

де:  $U_{\Phi EB}$  – напруга фотобатареї, В.

Представлене рівняння дозволяє враховувати вплив температури навколишнього середовища ( $T$ ) та інтенсивності сонячного випромінювання ( $G$ ) на вихідну потужність фотоелемента, однак дану модель необхідно також прив'язати до навантаження з метою оцінки його впливу на роботу системи ЗСЕМ в цілому, а це в свою чергу дасть можливість оцінити ефективність використання виробленої енергії та дати оцінку якості забезпечення.

Ефективність використання ФЕУ в автономних енерговузлах визначається кліматометорологічними умовами місцевості. При виборі ФЕУ для автономного енергозабезпечення проводиться попередня енергетична

оцінка потенціалу сонячної енергії, за якою визначають придатність конкретної території до використання фотоелектричних установок.

Виробіток електроенергії, яку можна отримати за рахунок фотоелектричного перетворення ( $W_{\Phi EY}$ , кВт· год) з урахуванням (3.6), можна визначити як:

$$\begin{aligned} W_{\Phi EY}(G, T) &= \tau_{\Phi EY} \cdot P_{\Phi EY}(G, T) = \tau_{\Phi EY} \cdot U_{\Phi EY} \cdot I_{\Phi EY}(G, T) = \\ &= \tau_{\Phi EY} \cdot U_{\Phi EY} \cdot \left( G(I_{K3} + K_I(T - T_{CT})) - I_D \cdot \left( e^{\frac{q \cdot U_{\Phi EY}}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \right) \end{aligned} \quad (4.5)$$

де:  $\tau_{\Phi EY}$  – час роботи фотоелектричної установки, год.

Рівняння можна вважати математичним описом виробітку електроенергії фотоелектричної батареї (або елемента) при конкретних умовах інтенсивності сонячного випромінювання ( $G$ ), температурі фотоелемента ( $T$ ), та часу перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію ( $\tau_{\Phi EB}$ ).

#### **4.2. Аналіз впливу кліматометеорологічних умов на роботу ЗСЕМ з використанням фотоелектричних установок**

Як відомо, виробіток електричної енергії ФЕУ залежить від кліматометеорологічних умов місцевості, на якій вона застосовується.

Промодельємо в програмному середовищі Matlab можливість забезпечення енергією ЗСЕМ від ФЕБ з врахуванням розподілу інтенсивності сонячного випромінювання для м. Вінниця, Україна, використавши при цьому реальні експериментальні дані вимірювання інтенсивності сонячної радіації ( $G$ ) для заданої місцевості. Для аналізу надходження сонячної радіації використаємо дані Мелітопольської актинометричної станції за 2017 рік, що реєструвалися на протязі року з інтервалом 10 хв. (24262 відліки).

Загальний вигляд закономірностей надходження сонячної радіації (рис. 4.3), приведеної до зимового часу, ілюструє екстремальний характер сонячної радіації як на протязі доби, так і на протязі року.

Тривалість світлового дня змінюється від 7 год в січні-грудні до 15 год в червні-липні симетрично відносно 11,5 год.

Слід відзначити, що добова інтенсивність сонячної радіації відрізняється від теоретичної косинусоїди внаслідок деякого розширення за рахунок радіації вранішньої та вечірньої зорі та практичної стабільності її максимальних значень від 10 до 13 год.

Максимальні значення сонячної радіації біля 1000 Вт/м<sup>2</sup> з варіацією всього в 7% мають місце з 70 по 250 дні, тобто на протязі половини року, зовні цього інтервалу радіація зростає в першій половині року від 500 до 1000 Вт/м<sup>2</sup>, а в другій половині – спадає до 400 Вт/м<sup>2</sup>. Таким чином, в залежності сонячної радіації від дня року можна виділити пряму радіацію і вважати її наближено косинусоїдальною, що накладається на сталу складову розсіяної радіації з максимальною інтенсивністю 400 – 500 Вт/м<sup>2</sup>.

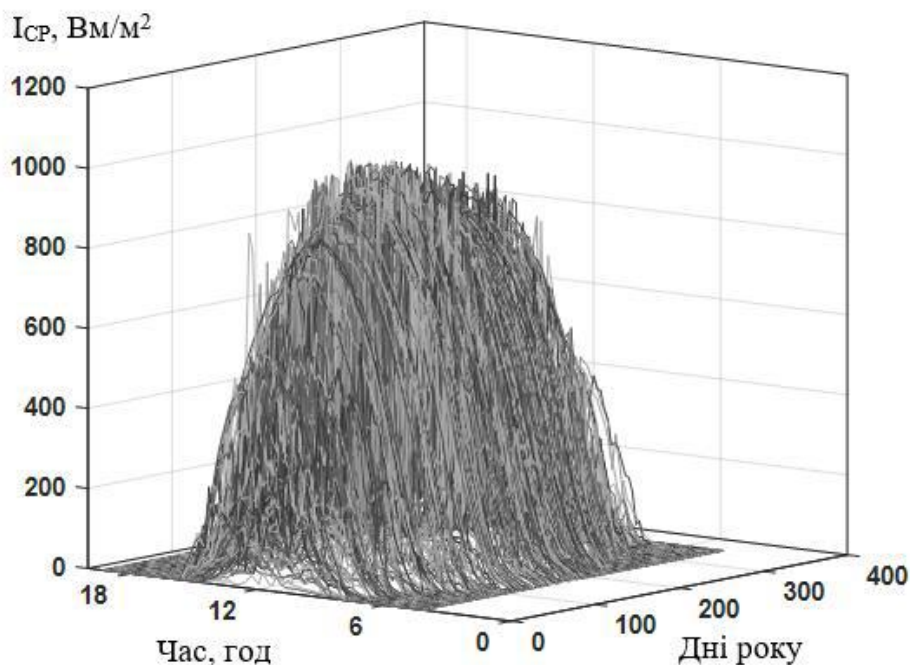


Рисунок 4.3 – Надходження сонячної радіації на протязі доби та на протязі року на основі реальних експериментальних даних для м. Вінниця



Якщо взяти середню і максимальну сонячну радіацію (рис. 3.4), то середня сонячна радіація складає близько половини максимальної і тримається на постійному рівні близько 500 Вт/м<sup>2</sup> від 50 до 270 днів. Але при таких загальних закономірностях добова сонячна радіація дуже сильно залежить від хмарності (рис. 3.5) і може на протязі літнього дня в сонячний день при мінливій хмарності змінюватися від 1000 до 150 – 400 Вт/м<sup>2</sup>.

Якщо ж брати до уваги і хмарні дні, то справа значно ускладнюється.

Максимальна сонячна радіація 6 січня за день складає всього 42 Вт·год/м<sup>2</sup>, в той час, як, наприклад, 23 травня, 1005 Вт·год /м<sup>2</sup>, тобто в залежності від пори року і метеорологічних умов рівень сонячної радіації може змінюватися в 25 разів, що разом з відсутністю сонячної радіації вночі, незалежно від того, що усереднення по інтервалах часу на протязі року дає досить стабільні значення середньої сонячної радіації, свідчить про необхідність обов'язкового акумулювання сонячної енергії для забезпечення неперервної роботи зарядної станції.

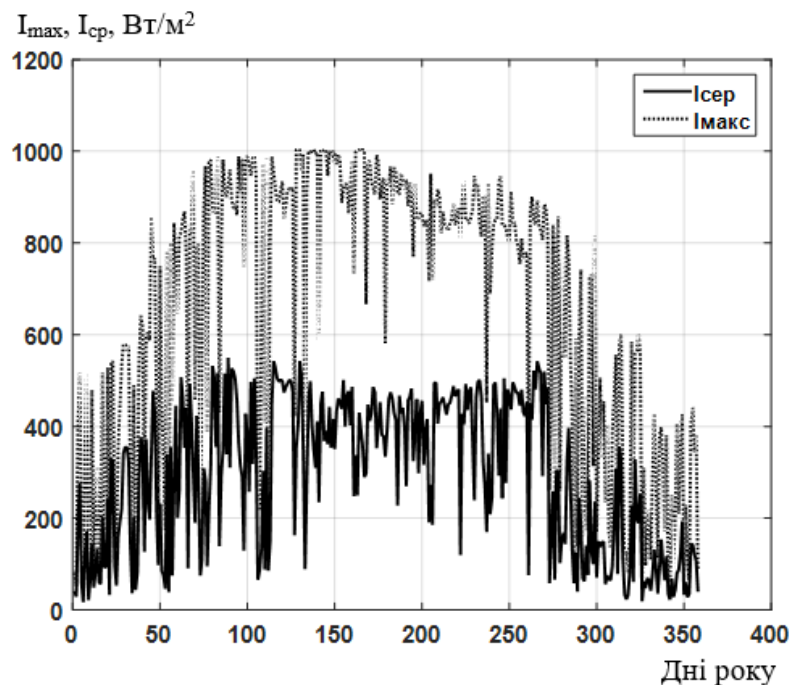


Рисунок 4.4 – Показники надходження середньої та максимальної сонячної радіації на протязі року на основі реальних експериментальних даних для м. Вінниця

Загальна інтегральна крива розподілу експериментальних даних (24262 значення) не відповідає жодному з теоретичних законів розподілу (рис. 3.6).

Найближче відповідають їй експоненціальний і гама розподіли (на графіку вони практично співпадають), однак з 300 Вт/м<sup>2</sup> відповідність порушується і експериментальний розподіл до максимального значення сонячної радіації досить добре описується рівномірним розподілом. Відповідно, і гістограма експериментального розподілу (рис. 4.5) від 300 до 900 Вт/м<sup>2</sup> зберігає практично сталі значення, може з невеликим мінімумом, зважаючи на значне число даних.

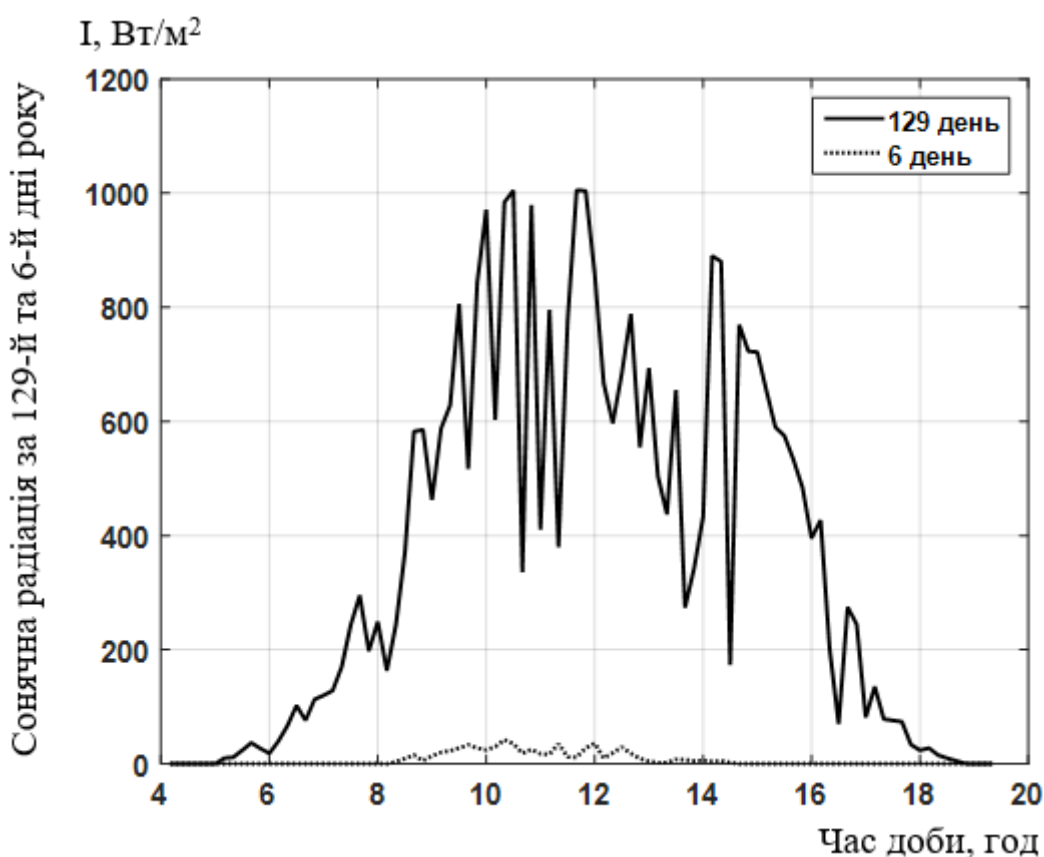


Рисунок 4.5 – Надходження добової сонячної радіації в дні з найбільшими показниками інтенсивності сонячної радіації (129 день 2017 року) та найменшими показниками інтенсивності сонячної радіації (6 день 2017 року) для м. Вінниця.

Статистична перевірка гіпотез про закон розподілу для критичного

значення критерію значимості за тестом Колмогорова – Смірнова дала такі значення: нормальний розподіл –  $3,2 \cdot 10^{-4}$ , Вейбула –  $1,2 \cdot 10^{-5}$ , логнормальний –  $1,1 \cdot 10^{-9}$ , логістичний –  $3,6 \cdot 10^{-4}$ , експоненціальний –  $4,2 \cdot 10^{-11}$ , гама –  $7,2 \cdot 10^{-7}$ . І лише рівномірний розподіл дійсно наближений до експериментального розподілу, наприклад для розподілу середніх значень сонячної радіації критерій значимості становить 0,0106.

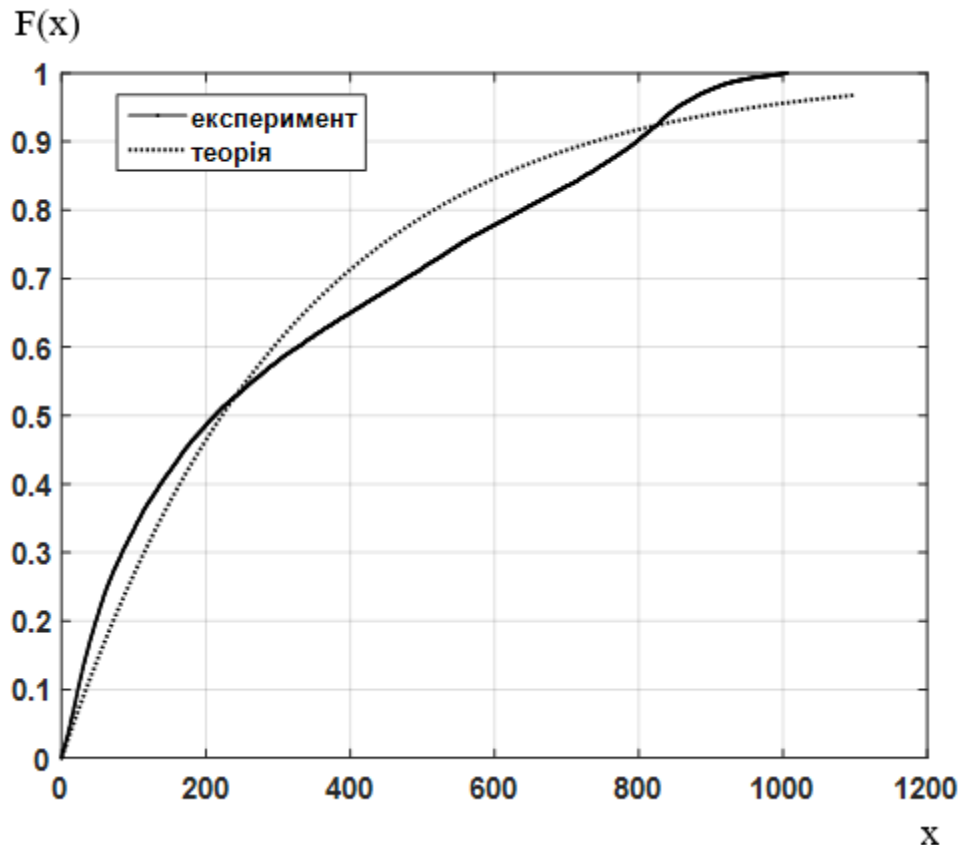


Рисунок 4.6 – Загальна інтегральна крива розподілу експериментальних даних інтенсивності сонячної радіації за 2018 рік для м. Вінниця

Крім того, помісячний розгляд інтенсивності сонячної радіації показує, що при максимальній інтенсивності сонячної радіації 400 – 600 Вт/м<sup>2</sup> періоди, коли максимальна сонячна радіація не перевищує 200 Вт/м<sup>2</sup>, у листопаді, грудні і січні можуть сягати 5 днів. В ці дні сумарний виробіток і накопичена енергії в акумуляторах повинні бути достатніми для заряду автомобіля з врахуванням короткого світлового дня. В той же час максимальна інтенсивність сонячної радіації у травні і у літні місяці досить

стабільно знаходиться на рівні 900÷1000 Вт/м<sup>2</sup>, так що при вибраній необхідній для роботи ЗСЕМ енергоємності буферного акумулятору виробіток ФЕБ може перевищувати потреби.

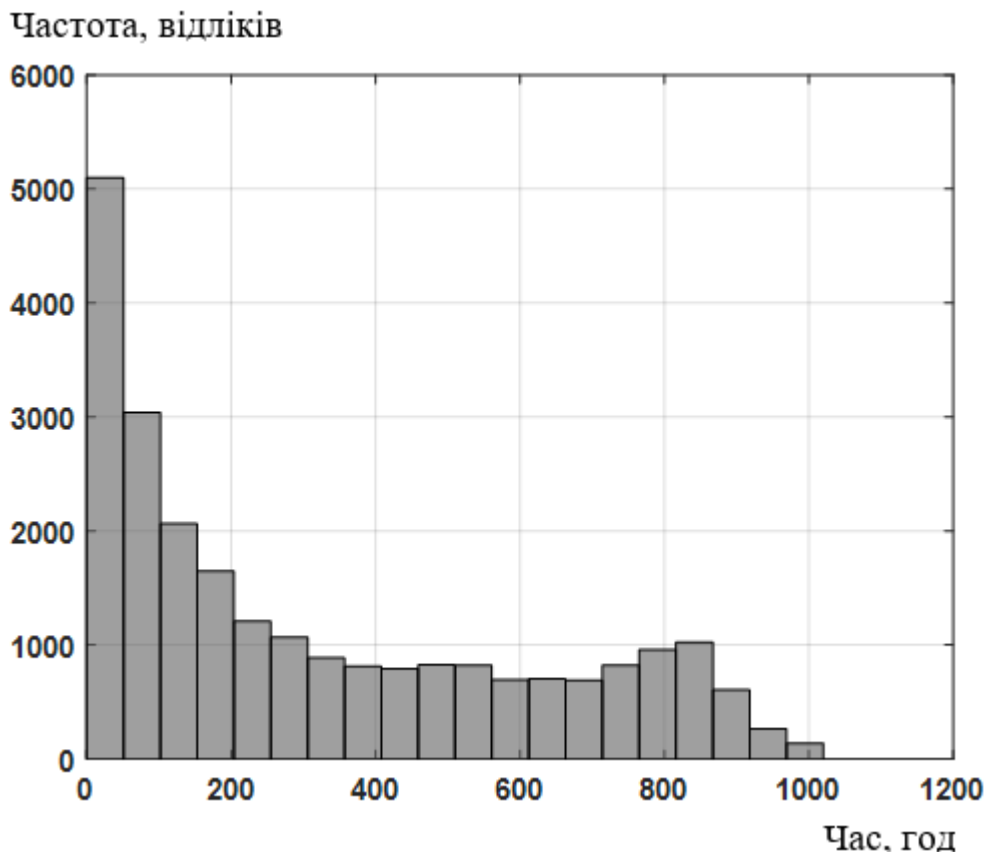


Рисунок 4.7 – Гістограма розподілу експериментальних даних інтенсивності сонячної радіації за 2018 рік для м. Вінниця

## 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розробка полікристалічного фотоелектричного перетворювача сонячної енергії у електричну з покращеним коефіцієнтом перетворення світла.

Для проведення технологічного аудиту було залучено 3-х незалежних експертів Вінницького національного технічного університету з кафедри метрології та промислової автоматики: ст. викл. Дудатьєв І. А., проф. Васілевський О.М., проф. Кулаков П. І. За допомогою таблиці 4.1 за п'ятибальною шкалою використовуючи 12 критеріїв оцінки комерційного потенціалу розробки експерти надали свої оцінки.

Таблиця 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри-терій	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів

Продовження табл. 5.1

5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років

Продовження табл. 5.1

12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту
----	---	--	---	--	---

Таблиця 5.2 – Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів СБ, розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0-10	Низький
11-20	Нижче середнього
21-30	Середній
31-40	Вище середнього
41-48	Високий

В таблиці 5.3 наведено результати оцінювання експертами комерційного потенціалу розробки.

Таблиця 5.3 – Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії	Прізвище, ініціали, посада експерта		
	Дудатьєв І. А.	Васілевський О. М.	Кулаков П. І.
	Бали, виставлені експертами:		
1	2	2	3
2	3	3	2
3	4	4	3
4	4	2	3
5	4	3	3
6	4	4	3
7	3	3	2
8	3	3	3
9	3	4	4
10	2	3	3

11	3	3	3
12	3	3	3
Сума балів	СБ <sub>1</sub> =40	СБ <sub>2</sub> =40	СБ <sub>3</sub> =38
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_{i=1}^3 СБ_i}{3} = \frac{40 + 40 + 38}{3} = 39$		

Середньоарифметична сума балів, розрахована на основі висновків експертів склала 39, що згідно таблиці 4.2 вважається, що рівень комерційного потенціалу розробки є вище середнього.

Сьогодні з постійним подорожчанням електроносіїв пошук та використання альтернативних джерел енергії набуває все більшої актуальності. Тому розробка полікристалічного фотоелектричного перетворювача сонячної енергії у електричну з покращеним коефіцієнтом перетворення світла є необхідним на підприємствах електропостачання.

Проведемо порівняння нової розробки з аналогом, який існує на ринку. В якості аналога для розробки було обрано фотопанель фірми АЛБТ модель Л900.

Основними недоліками аналога є те, що фотоенергетичне обладнання може достатньо ефективно експлуатуватися протягом всього року, але максимально ефективним є протягом 7 місяців на рік (з квітня по жовтень). Також до недоліків можна віднести те, що енергія виробляється лише протягом світлового дня, тому для ефективного використання сонячних батарей необхідно подбати про засоби перетворення та накопичення струму.

У розробці дана проблема вирішується збільшенням ККД. Також система випереджає аналог за такими параметрами як надійність та довговічність, час роботи на відмову.

В таблиці 5.4 наведені основні техніко-економічні показники аналога і нової розробки.



Таблиця 5.4 – Основні технічні показники аналога і нової розробки

Показники	Аналог	Нова розробка	Відношення параметрів нової розробки до параметрів аналога
ККД	40%	50%	1,25
Вольтаж на виході	12 В	24 В	2
Струм на виході	1 А	2 А	2
Потужність	2 кВт	3 кВт	1,5
Дрейф нуля	+1 В	=-0,1 В	0,1

Виходячи з даних таблиці 5.4 видно, що аналог вже не відповідає сучасним вимогам через великі втрати. Причинами оптичних втрат в сонячних елементах є відбиття частини сонячного випромінювання від поверхні ФЕП і затінення із контактною сіткою. Зниження коефіцієнта відбиття  $R$  досягається нанесенням на поверхню ФЕП просвітлюючих покриттів у вигляді тонких плівок, що забезпечують інтерференцію і взаємне гасіння світлових хвиль, відбитих від поверхні плівки і від кордону плівка-напівпровідник. Інтегральний коефіцієнт відбиття, таким чином, може бути зменшений від  $R \approx 35\%$  для непросвітленої поверхні до  $R \approx 10\%$  при використанні одношарових просвітлюючих покриттів.

Проведемо оцінку якості продукції, яка є найефективнішим засобом забезпечення вимог споживачів та порівняємо її з аналогом.

Визначимо відносні одиничні показники якості по кожному параметру за формулами (5.1) та (5.2) і занесемо їх у відповідну колонку табл. 5.5.

$$q_i = \frac{P_{Hi}}{P_{Bi}} \quad (5.1)$$

або

$$q_i = \frac{P_{Bi}}{P_{Hi}} \quad (5.2)$$

де  $P_{ni}$ ,  $P_{bi}$  – числові значення  $i$ -го параметру відповідно нового і базового виробів.

Таблиця 5.5 – Основні параметри нової розробки та товару-конкурента

Показник	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (товар-конкурент)	Новий (інноваційне рішення)		
1	2	3	4	5
ККД, %	40	50	1,25	15%
Вольтаж на виході, В	12	24	2	15%
Струм на виході, А	1	2	2	10%
Потужність, кВт	2	3	1,5	25%
Час роботи на відмову, год	1000	2000	2	35%

$$q_1 = \frac{50}{40} = 1,25;$$

$$q_2 = \frac{24}{12} = 2;$$

$$q_3 = \frac{2}{1} = 2;$$

$$q_4 = \frac{3}{2} = 1,5;$$

$$q_5 = \frac{2000}{1000} = 2.$$

Відносний рівень якості нової розробки визначаємо за формулою:

$$K_{\text{я.в.}} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot \alpha_i, \quad (5.3)$$

$$K_{\text{я.в.}} = 1,25 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,1 + 1,5 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,35 = 1,76$$

Відносний коефіцієнт показника якості нової розробки більший одиниці, отже нова розробка якісніший базового товару-конкурента.

Наступним кроком є визначення конкурентоспроможності товару. Конкурентоспроможність товару є головною умовою конкурентоспроможності підприємства на ринку і важливою основою прибутковості його діяльності.

Однією із умов вибору товару споживачем є збіг основних ринкових характеристик виробу з умовними характеристиками конкретної потреби покупця. Такими характеристиками найчастіше вважають нормативні та технічні параметри, а також ціну придбання та вартість споживання товару.

Приблизна ціна нового товару складе 65000 грн. Занесемо ці та інші показники (взяті з попередніх розрахунків) до табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Нормативні, технічні та економічні параметри інноваційного рішення і товару-виробника

Показники	Варіанти	
	Базовий (товар- конкурент)	Новий (інноваційне рішення)
1	2	3
1. Нормативно-технічні показники		
ККД, %	40	50
Вольтаж на виході, В	12	24
Струм на виході, А	1	2
Потужність, кВт	2	3
Час роботи на відмову, год	1000	2000
2. Економічні показники		
Ціна придбання, грн	70000	65000

Загальний показник конкурентоспроможності інноваційного рішення (К) з урахуванням вищезазначених груп показників можна визначити за формулою:

$$K = \frac{I_{m.n.}}{I_{e.n.}}, \quad (5.4)$$

де  $I_{m.n.}$  – індекс технічних параметрів;  $I_{e.n.}$  – індекс економічних параметрів.

Індекс технічних параметрів є відносним рівнем якості інноваційного рішення. Індекс економічних параметрів визначається за формулою (5.5)

$$I_{e.n.} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Hei}}{\sum_{i=1}^n P_{Bei}}, \quad (5.5)$$

де  $P_{Hei}$ ,  $P_{Bei}$  – економічні параметри (ціна придбання та споживання товару) відповідно нового та базового товарів.

$$I_{e.n.} = \frac{65000}{70000} = 0,93;$$

$$K = \frac{1,76}{0,93} = 1,89.$$

Зважаючи на розрахунки, можна зробити висновок, що нова розробка буде конкурентоспроможніше, ніж конкурентний товар.

## 5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи

1. Основна заробітна плата – винагорода за виконану роботу відповідно до встановлених норм праці. Вона встановлюється у вигляді тарифних ставок (окладів) і відрядних розцінок для робітників та посадових окладів для службовців. Стаття «Основна заробітна плата робітників» містить витрати на виплату основної заробітної плати робітникам, зайнятим виробництвом продукції.

Основна заробітна плата кожного із розробників (дослідників)  $Z$  розраховується за формулою:

$$Z = \frac{M}{T_p} \cdot t, [грн.] \quad (5.6)$$

де  $M$  – місячний посадовий оклад конкретного розробника.

$T_p$  – число робочих днів,  $T_p = 22$ ;

$t$  – число днів роботи розробника.

Розрахунки основної заробітної плати зведемо в таблицю 4.7:

Таблиця 4.7 – Розрахунок основної заробітної плати розробників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
Керівник	10000	454.5	5	2273
Інженер	5000	227.3	35	7955
Всього				10227

2. Основна заробітна плата робітників  $Z_p$  розраховується за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n t_i \cdot C_i, \quad (5.7)$$

де  $n$  – число робіт по видах та розрядах;

$t_i$  – норма часу на виконання конкретної операції, годин;

$C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує певну роботу, грн./год.:

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_i}{T_p \cdot T_{zm}}, \quad (5.8)$$

де  $M_m$  – мінімальна місячна оплата праці, грн.;

$K_i$  – тарифний коефіцієнт робітника даного розряду;

$T_p$  – число робочих днів в місяці ( $T_p = 21 \dots 23$  дні);

$T_{zm}$  – тривалість зміни, годин ( $T_{zm} = 8$  годин).

Мінімальна місячна оплата праці робітника з 01.01.2019 року складає 4173,00 грн.

$K_i$  – тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду. Величина чинних тарифних коефіцієнтів робітників відповідних розрядів для бюджетної сфери наведена в таблиці 4.8:

Таблиця 5.8 – Тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду

Розряд	$K_i$
1	1,00
2	1,09
3	1,18
4	1,27
5	1,36
6	1,45
7	1,54
8	1,64

Інформацію про основну заробітну плату заносимо до таблиці 5.9

Таблиця 5.9 – Основна заробітна плата робітників

Найменування робіт	Трудомісткість, нормо-годин	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка, грн.	Величина оплати, грн.
1	2	3	4	5
Налагоджувальні	3	4	30,1	90,3
Складальні	2	4	30,1	60,2
Механічні	1	3	28,0	28,0
Заготівельні	4	2	25,8	103,4
Всього				281,9

3. До статті «Додаткова заробітна плата» відносяться витрати на виплату виробничому персоналу підприємства додаткової заробітної плати за працю понад установлені норми, заохочувальні виплати за поточну виробничу діяльність, компенсаційні виплати тощо. Звичайно, ці витрати встановлюються у відсотках до основної заробітної плати на підставі відповідних розрахунків на підприємстві:

$$Z_o = 11\% \cdot Z_\Sigma, \quad (5.9)$$

$$Z_o = 11\% \cdot (10227 + 281,9) = 1156,01(\text{грн.}).$$

4. Витати на соціальні заходи виникають внаслідок здійснення обов'язкової сплати єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування. Відрахування на соціальні заходи здійснюється від

суми всіх витрат на оплату праці робітників, зайнятих безпосередньо виробництвом продукції:

$$B_{cz} = (Z_{\Sigma} + Z_o) \cdot \frac{\beta}{100\%}, \quad (5.10)$$

де  $\beta$  – ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, %.

З 1.01.2016 року ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування встановлена залежно від класу професійного ризику виробництва і для бюджетної сфери  $\beta=22,0\%$ .

$$B_{cz} = (10227 + 281,9 + 1156,01) \cdot \frac{22,0\%}{100\%} = 2566,34 \text{ (грн.)}.$$

5. У спрощеному вигляді амортизаційні відрахування у загальному можуть бути розраховані за формулою:

$$A = \frac{Ц \cdot T}{T_{кор} \cdot 12} \text{ [грн]}, \quad (5.11)$$

де  $Ц$  – балансова вартість даного виду обладнання (приміщень), грн.;

$T_{кор}$  – час користування;

$T$  – термін використання обладнання (приміщень), цілі місяці.

Згідно пункту 137.3.3 Податкового кодекса амортизація нараховується на основні засоби вартістю понад 2500 грн.

Всі проведені розрахунки амортизаційних відрахувань заносимо в табл. 4.10.

Таблиця 5.10 – Розрахунок амортизаційних відрахувань

Найменування обладнання, приміщень	Балансова вартість, грн.	$t_{кор}$ (р)	Термін використання міс.	Величина амортизаційних відрахувань, грн.
ПК + панель оператора	7000	2	2	583,33
ПЛК	10000	4	2	416,67
Всього				1000,00

6. Норма витрат матеріалу – це плановий показник, який визначає максимально допустимі затрати відповідних ресурсів на виробництво одиниці продукції в умовах певного рівня техніки і організації виробництва.

Витрати на матеріали  $M$ , що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i - \sum_1^n B_i \cdot C_v \quad \text{грн.}, \quad (5.12)$$

- де  $H_i$  – витрати матеріалу  $i$ -го найменування, кг;  
 $C_i$  – вартість матеріалу  $i$ -го найменування, грн./кг.;  
 $K_i$  – коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i = (1, 1 \dots 1, 15)$ ;  
 $B_i$  – маса відходів матеріалу  $i$ -го найменування, кг;  
 $C_v$  – ціна відходів матеріалу  $i$ -го найменування, грн/кг;  
 $n$  – кількість видів матеріалів.

Інформацію про використані матеріали подамо у вигляді табл. 5.11.

Таблиця 5.11 – Матеріали, що використані на розробку

Найменування матеріалу	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість витраченого матеріалу, грн.
Флюс ФКСН	4	0,05	0,2
Каніфоль	11	0,3	3,3
Припій ПОС-61	500	0,1	50
Всього			53,5
З врахуванням коефіцієнта транспортування			58,85

4. Витрати на комплектуючі вироби, які використовують при виготовленні одиниці продукції, розраховуються, згідно їх номенклатури, за формулою:

$$K = \sum_{i=1}^n H_i \cdot C_i \cdot K_i, \quad (5.13)$$

де  $H_i$  – кількість комплектуючих  $i$ -го виду, шт.;



$C_i$  – покупна ціна комплектуючих  $i$ -го найменування, грн.;

$K_i$  – коефіцієнт транспортних витрат (1,1...1,15).

Таблиця 5.12 – Комплектуючі, що використані на розробку

Найменування	Витрачено, шт.	Ціна, грн.	Вартість, грн.
Датчик вологості	1	400	400
Фотодіод	3	30	90
Світлодіод	3	30	90
Оптичний тракт	1	100	100
Корпус	1	200	200
Тумблер	1	15	15
Діоди стану	2	2	4
Панель оператора	1	2000	2000
Операційний підсилювач	1	2	2
Інтерфейси	2	70	140
Всього (з врахуванням транспортних витрат)			3345.10

8. До статті «Паливо та енергія на технологічні цілі» відносяться витрати на всі види палива й енергії, що безпосередньо використовуються у процесі виробництва продукції. У даному випадку будемо враховувати лише витрати на електроенергію. Витрати на енергію визначаються на основі витрат на одиницю продукції та тарифів на енергію за допомогою залежності:

$$V_e = V \cdot P \cdot \Phi \cdot K_{\Pi}, \quad (5.14)$$

де  $V$  – вартість 1 кВт енергії, грн.  $V = 8,44$  грн./кВт\*год.;

$P$  – установлена потужність обладнання, кВт. При паяні використовується паяльник потужність  $P = 500$  Вт або  $P = 0,5$  кВт;

$\Phi$  – фактична кількість годин роботи обладнання, год.  $\Phi = 90$  год.;

$K_{\Pi}$  – коефіцієнт використання потужності,  $K_{\Pi} = 0,65$ .

$$V_e = 8,44 \cdot 0,5 \cdot 90 \cdot 0,65 = 246,87 (\text{грн}).$$

9. Інші витрати  $B_{in}$  охоплюють: витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці тощо.

Інші витрати  $B_{in}$  можна прийняти як (100...300)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які виконували дану МКНР, тобто:

$$B_{in} = (1..3) \cdot (3 + 3_p). \quad (5.15)$$

$$B_{in} = 1 \cdot (10227 + 281,9) = 10509,19 (\text{грн.})$$

Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати, які безпосередньо стосуються даного розділу МКНР

$$B = 10227 + 281,9 + 1156,01 + 2566,34 + 1000 + 58,85 + 3345,10 + 246,87 + 10509,19 = 29391,5 \text{ грн.}$$

Загальна вартість всієї МКНР визначається за формулою:

$$B_{заг} = \frac{B}{\alpha} \quad (5.16)$$

$$B_{заг} = \frac{29391,5}{0,5} = 58783,09 (\text{грн.})$$

Прогнозування загальних втрат ЗВ на виконання та впровадження результатів виконаної МКНР здійснюється за формулою:

$$ЗВ = \frac{B}{\beta}, \quad (5.17)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, який характеризує стадію виконання даної НДР.

Оскільки, робота знаходиться на стадії розробки дослідного зразка, то коефіцієнт  $\beta = 0,5$ .

Звідси:

$$ЗВ = \frac{58783,09}{0,5} = 117566,19 (\text{грн.}).$$

### 5.3 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації результатів розробки

У даному підрозділі кількісно спрогнозуємо, яку вигоду, зиск можна отримати у майбутньому від впровадження результатів виконаної наукової роботи. Розрахуємо збільшення чистого прибутку підприємства  $\Delta\Pi_i$ , для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки, за формулою

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\nu}{100}\right) \quad (5.18)$$

де  $\Delta C_o$  – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році.

$N$  – основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки;

$\Delta N$  – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки:

$C_o$  – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки;

$n$  – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки:

$\lambda$  – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. Ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт  $\lambda = 0,8333$ .

$\rho$  – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту.  $\rho = 0,25$ ;

$x$  – ставка податку на прибуток. У 2019 році – 18%.

Припустимо, що при впровадженні результатів наукової розробки покращується якість, що дозволяє підвищити ціну його реалізації на 1000 грн. Кількість одиниць реалізованої продукції також збільшиться: протягом

першого року на 15 шт., протягом другого року – на 25 шт., протягом третього року на 35 шт. Реалізація продукції до впровадження розробки складала 10 шт., а її ціна 65000 грн. Розрахуємо прибуток, яке отримає підприємство протягом трьох років.

$$\Delta\Pi_1 = [1000 \cdot 10 + (65000) \cdot 15] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) = 168264,1 (\text{грн.})$$

$$\Delta\Pi_2 = [1000 \cdot 10 + (65000) \cdot (15 + 25)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) = 454148,9 (\text{грн.})$$

$$\Delta\Pi_3 = [1000 \cdot 10 + (65000) \cdot (15 + 25 + 35)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) = 842779,19 (\text{грн.})$$

#### 5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності

Розрахуємо основні показники, які визначають доцільність фінансування наукової розробки певним інвестором, є абсолютна і відносна ефективність вкладених інвестицій та термін їх окупності. Теперішню вартість інвестицій  $PV$ , що вкладаються в наукову розробку приймемо рівну загальним витратам  $PV = ZB = 117566,19$  грн.

Розрахуємо абсолютну ефективність вкладених інвестицій  $E_{abc}$  згідно наступної формули:

$$E_{abc} = (ПП - PV) \tag{5.19}$$

де  $ПП$  – приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство від реалізації результатів наукової розробки, грн.;

$$ПП = \sum_1^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^i}, \tag{5.20}$$

де  $\Delta\Pi_i$  – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДЦКР, грн.;

$T$  – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої НДДКР, роки;

$\tau$  – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,2;

$t$  – період часу (в роках).

$$ПП = \frac{168264,1}{(1+0,2)^1} + \frac{454148,9}{(1+0,2)^2} + \frac{842779,19}{(1+0,2)^3} = 945589,17(\text{грн.}).$$

$$E_{abc} = (945589,17 - 117566,19) = 828022,97(\text{грн.}).$$

Оскільки  $E_{abc} > 0$  то вкладання коштів на виконання та впровадження результатів НДДКР може бути доцільним.

Розрахуємо відносну (щорічну) ефективність вкладених в наукову розробку інвестицій  $E_{\epsilon}$ . Для цього користуються формулою:

$$E_{\epsilon} = \sqrt[T_{жс}]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1, \quad (5.21)$$

$T_{жс}$  – життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_{\epsilon} = \sqrt[3]{1 + \frac{828022,97}{117566,19}} - 1 = 1 = 100\%$$

Визначимо мінімальну ставку дисконтування, яка у загальному вигляді визначається за формулою:

$$\tau = d + f, \quad (5.22)$$

де  $d$  – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2018 році в Україні  $d = (0,14 \dots 0,2)$ ;

$f$  – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина  $f = (0,05 \dots 0,1)$ .

$$\tau_{\min} = 0,18 + 0,05 = 0,23.$$

Так як  $E_g > \tau_{\min}$  то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

Розрахуємо термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій за формулою:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g} \quad (5.23)$$

$$T_{ок} = \frac{1}{1} = 1 \text{ (роки)}$$

Так як  $T_{ок} \leq 3...5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки в принципі є доцільним.

## 5.5 Висновки до економічного розділу

Було проведено оцінку комерційного потенціалу розробки полікристалічного фотоелектричного перетворювача сонячної енергії у електричну з покращеним коефіцієнтом перетворення світла, який є вище середнього. При порівнянні нової розробки з аналогом виявлено, що вона є якіснішою і конкурентоспроможнішою відносно аналога, а також краще по технічним і економічним показникам.

Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи по кожній з статей витрат складе 29391,5 грн. Загальна ж величина витрат на виконання та впровадження результатів даної НДР буде складати 117566,19 грн.

Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 1 рік при прогнозованому прибутку 945589,17 грн. за три роки.

## ВИСНОВКИ

В роботі вирішена важлива науково-прикладна проблема обґрунтування техніко-економічних параметрів фотопанелей з буферними акумуляторами енергії при використанні енергії сонячного випромінювання.

В роботі одержані наступні наукові та практичні результати:

Проведено огляд найкращих світових новинок по даній темі, проаналізовано сучасні методи та засоби випробувань сонячних перетворювачів, стан їх нормативного забезпечення і наявну контрольновимірвальну апаратуру для випробувань сонячних фотоелементів.

Обґрунтовано умови створення мереж зарядних станцій електромобілів з використання вітроелектричних та фотоелектричних установок, що визначаються довжиною пробігу електромобіля, енергозабезпеченістю станції від відновлюваних джерел, нормованим часом зарядження електромобіля, критичними часом очікування на виконання заявки по обслуговуванню та площею під встановлення енергогенеруючого устаткування.

Розроблено математичну модель процесу зарядження акумуляторних батарей за рахунок практичного впровадження методик сонячних перетворювачів стосовно визначення теплових характеристик у закритих приміщеннях із застосуванням імітаторів потоку сонячного випромінювання

Обґрунтовано параметри буферних акумуляторів енергії та енергетичного обладнання та устаткування відновлюваної енергетики в залежності від енергобалансових потреб зарядної станції електромобілів, що вперше дозволило проаналізувати фактори, які впливають на міжзарядний пробіг електромобілів, показують реальну величину даного показника в сторону зменшення, тобто в середньому практичний міжзарядний пробіг може знижуватися на 20-50% в порівнянні з вказаним виробником ЕМ. З цієї причини на сучасному рівні розвитку автономних джерел живлення для зарядження тягових АБ ЕМ середня відстань між станціями «швидкої

зарядки» на міжміських трасах не повинна перевищувати 75-80 км практично для всіх електромобілів, що мають серійне виробництво.

Проаналізовано економічні аспекти від реалізації розробленої системи.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Серкез Х.В. Метрологічне забезпечення випробувань сонячних колекторів / Х.В. Серкез, В.О. Яцук, П.Г. Столярчук, М.М. Микийчук, Р.П. Дяк, Т.М. Олеськів // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань», 23-27 травня 2013 р. – Львів: НУ «ЛП», 2013. – С. 150.
2. Возняк О. Т. Енергетичний потенціал сонячної енергетики та перспективи його використання в Україні / О. Т. Возняк, М. Є. Янів // Вісн. Нац. унту "Львів. політехніка". Теорія і практика буд-ва. - 2010. - N 664. - С. 7-10.
3. Малеев В.О. Перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні / В.О. Малеев, В.М. Безпальченко, Д.С. Макаруч // Актуальні проблеми сучасної енергетики: матеріали II-ої Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. – Херсон : ХНТУ, 2017. – С.74–70.
4. Будько В. І. Сучасні технологічні процеси, обладнання та устаткування фотоелектричного перетворення сонячної енергії / В. І. Будько – серія навчально-методичних матеріалів – Київ: ЮНІДО, 2015. – 49 с.
5. Стоян О.Ю. Державне регулювання розвитку сонячної енергетики в Україні: від теорії до практики / О.Ю. Стоян // Наукові праці [Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу "Києво-Могилянська академія"]. Серія : Державне управління. - 2014. - Т. 239, Вип. 237. - С. 124-130.
6. Дероган Д.В. Перспективи використання енергії та палива в Україні з нетрадиційних та відновлюваних джерел / Д.В. Дероган, А.Р. Щокін //Бюл. "Новітні технології в сфері нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії". – К.: АТ "Укренергозбереження",1999. – №2. – С.30–38.
7. Столярчук П. Г. Розробка математичної моделі ефективності

сонячних перетворювачів / П. Г. Столярчук, В. О. Яцук, М. М. Микийчук, М. С. Міхалєва, О. І. Шпак, Т. М. Олеськів // Східно-європейський журнал передових технологій. –5/8 (71), 2014. – С. 30-36.

8. Будько В.І. Комплексне використання ВДЕ в складі зарядних станцій акумуляторних батарей електромобілів / В.І. Будько // XV Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Київ, 2014.–С.112–114.

9. Будько В.І. Аналіз можливостей використання сонячної енергії як додаткового енергоджерела в НТУУ «КПІ» / В.І. Будько // XII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Крим, 2011.– С.216–217.

10. Будько В.І. Пілотний проект сонячної станції в НТУУ «КПІ» для часткового покриття потреби в електричній енергії навчальних корпусів, задіяних в роботі приймальної комісії / В.І. Будько // XIII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Крим, 2012.–С.229–232.

11. Будько В.І. Можливості використання відновлюваних джерел енергії на підприємствах агропромислової та харчової галузей України / В.І. Будько, Р.А. Климюк // Відновлювана енергетика. – 2013. – №4. – С.26–30.

12. Мхитарян Н.М. Комплексное использование энергии возобновляемых источников / Н.М. Мхитарян, С.А. Кудря, Л.В. Яценко, Л.Я. Шинкаренко, М.Д. Ткаленко, В.И. Будько // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – №17. –С.14–22.

13. Будько В.І. Концепція зарядження акумуляторної батареї електромобіля від фотоелектричної станції / В.І. Будько, С.О. Кудря, В.Б. Павлов // Відновлювана енергетика. – 2014. – №1. – С.14–21.

14. Лежнюк П.Д., Бартецький А.А., Бартецька І.А. Оптимізація роботи фотоелектричних станцій для забезпечення балансової стійкості енергосистеми // Вчені записки Таврійського національного університету

імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки. – Том 29, №5, частина 2. – 2018. – С. 114–118.

15. Вілінський О. О. Термоелектричний перетворювач сонячного випромінювання в електроенергію / О.О. Вілінський, Л.Ю. Цибульський // Матеріали XI-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, 6-7 квітня 2017 р. – С. 145-150. (електронне видання)

16. Захарченко Р.В., Воробйов Ю.В. Оптимізація будови фотоелектричної панелі для гібридної ФЕ/термічної системи. [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL: [http://www.rusnauka.com/11\\_NPE\\_2014-/Phisica/2\\_165910-.doc.htm](http://www.rusnauka.com/11_NPE_2014-/Phisica/2_165910-.doc.htm)

17. Фреїк Д.М. Фотоелектричні перетворювачі сонячного випромінювання. Досягнення, сучасний стан і тенденції розвитку (огляд) / Д.М. Фреїк, В.М. Чобанюк, М.О. Галушак, О.С. Криницький, Г.Д. Матеїк // ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА. – 2012. – №1 Т.13. – С. 7 – 20.

18. Solar parking lot with electric car charging stations opens in Tennessee. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.autoblog.com/2010/08/23/solar-parking-lot-with-electric-car-chargingstations-opens-in-t/> Solar electric vehicle charging station. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.facilities.uiowa.edu/uem/renewable-energy/solar-energy.html>

19. Solar tree. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://envisionsolar.com/products/solar-tree/>

20. Giraffe 2.0 is a Hybrid Wind-Solar Power Station & Carport. 40. Solar tree. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.innoventum.se/giraffe-2-0/>

21. Tesla solar charger: How much does it cost to charge a Tesla using solar energy? [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://news.energysage.com/what-does-it-cost-to-charge-a-tesla-with-solar-energy/>

22. Chargers. [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<http://www.chademo.com/>

23. Photovoltaic Modules [Электронный ресурс] – Режим доступа :  
[https://www.mitsubishielectricsolar.com/images/uploads/documents/specs/MLU\\_spec\\_sheet\\_250W\\_255W.pdf](https://www.mitsubishielectricsolar.com/images/uploads/documents/specs/MLU_spec_sheet_250W_255W.pdf)

## **ДОДАТКИ**

## Додаток А



## Додаток Б

### Лістинг програми контролю

```
function D = PO(V, I, T)

persistent Pn Po dP d dd n;

if isempty(V)
    V=20;
end
if isempty(I)
    I=0;
end
if isempty(Po)
    Po=0;
end
if isempty(Pn)
    Pn=0;
end
if isempty(dP)
    dP=0;
end
if isempty(d)
    d=1;
end
if isempty(dd)
    dd=0;
end
if isempty(n)
    n=1;
end

if (T>n*0.02)
    n=n+1;
    Po=Pn;
    Pn=V*I;
    dP=Pn-Po;

    if (dd==0)
        if dP>1
            dd=0.01;
            d=d+dd;
        else
            if (dP<-1)
                dd=-0.01;
                d=d+dd;
            else
                dd=0;
            end
        end
    else
        if ((dP<1) && (dP>-1))
            dd=0;

            d=d+dd;
        else
            if ((dP/dd)>0)
                dd=0.01;
                d=d+dd;
            else
                dd=-0.01;
                d=d+dd;
            end
        end
    end
end
```



```
                else
                    dd=-0.01;
                    d=d+dd;
                end
            end
        end
    end
    D=d/(d+1);

    if (D<0.1)
        D=0.1;
        d=D/(1-D);
    else
        if (D>0.9)
            D=0.9;
            d=D/(1-D);
        else
            end
        end
    end
end
end
```

## Додаток В

### Вигляд експериментальної фотопанелі

