

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Проект системи вуличного освітлення**
на базі сонячної міні-електростанції

Виконав: студент 6 курсу, групи ЕТм-61

спеціальності 141 – Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Назаров Ю. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Оробчук Б.Я.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Трембач Р.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2025 р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту НАЗАРОВУ Юрію Васильовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проект системи вуличного освітлення
на базі сонячної міні-електростанції

Керівник роботи Оробчук Богдан Ярославович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 12 » листопада 2025 року № 4/7-966

2. Термін подання студентом завершеної роботи грудень, 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Статистичні дані про навантаження систем вуличного освітлення
міських та сільських населених пунктів; розподіл сонячного випромінювання над поверхнею
Землі; фотоелектричні перетворювачі і принцип роботи сонячних батарей

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ

2. Розрахунково-дослідницький розділ

3. Проектно-конструкторський розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Актуальність теми, предмет і об'єкт дослідження, поставленні задачі та шляхи їх розв'язку

2. Схема розподілу сонячної радіації над поверхнею Землі та територією України

3. Автономна енергоустановка на базі ВДЕ та узгодження ВДЕ із споживачами

4. Аналіз контролерів заряду та принципу їх роботи

5. Дослідження роботи і конструкції розробленої системи

6. Система вуличного освітлення з живленням від міні-СЕС

7. Дослідження характеристик фотоелектричних систем

8. Конструктивні елементи інтелектуального світильника

9. Загальні висновки до кваліфікаційної роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Гурик О.Я., к.т.н., доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Стручок В.С., ст. викладач		
Нормоконтроль	Коваль В.П., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання листопад 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний розділ		
2	Проектно-конструкторський розділ		
3	Розрахунково-дослідницький розділ		
4	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях		
5	Оформлення пояснювальної записки		
6	Оформлення графічної частини		

Студент

(підпис)

Назаров Ю. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Оробчук Б. Я.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Назаров Ю.В. Проєкт системи вуличного освітлення на базі сонячної міні-електростанції. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТм-61. – Тернопіль: ТНТУ, 2025.

Стор. - 84; рис. - 49; табл. - 3; слайдів - 20; джерел – 30

У кваліфікаційній роботі розглянуто різні види одержання електричної енергії за допомогою поновлюваних джерел енергії. Виконано дослідження фотоелектричних перетворювачів і принципу роботи сонячних батарей та проведено розрахунок системи освітлення. Розглянуто передумови для розробки проєкту міні-СЕС, здійснено розрахунок числа та потужності сонячних панелей міні-СЕС та кількості акумуляторних батарей і їх ємності. Розроблено проєкт ефективної системи вуличного освітлення на базі сонячної міні-електростанції та виконано вибір основних її елементів.

Ключові слова: альтернативні джерела енергії, види вуличного освітлення, сонячні батареї, сонячна міні-електростанція.

ABSTRACT

Y. Nazarov. Project of a street lighting system based on a solar mini-power plant. 141 - Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics. Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering. Chair of Electrical Engineering, group ETm-61. – Ternopil: TNTU, 2025.

Page – 84; Illustrations – 49; Tables – 14; Blueprints – 20; Sources – 30

The qualification work considered various types of obtaining electrical energy using renewable energy sources. A study of photovoltaic converters and the principle of operation of solar panels was carried out and a lighting system was calculated. The prerequisites for developing a mini-SPP project were considered, the number and power of mini-SPP solar panels and the number of batteries and their capacity were calculated. A project for an effective street lighting system based on a solar mini-power station was developed and its main elements were selected.

Key words: alternative energy sources, types of street lighting, solar panels, solar mini-power plant.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	13
1.1 Розподіл сонячного випромінювання над поверхнею Землі	13
1.2 Особливості клімату на території Західної України	15
1.3 Енергоустановки на базі відновлюваних джерел енергії	17
1.4 Аналіз контролерів заряду та принципу їх роботи	20
1.5 Аналіз накопичувачів електричної енергії	23
1.6 Висновки до розділу 1	26
2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	27
2.1 Дослідження фотоелектричних перетворювачів і принципу роботи сонячних батарей	27
2.2 Розрахунок системи освітлення	34
2.3 Дослідження роботи і конструкції розробленої системи	37
2.4 Обґрунтування орієнтації сонячних панелей	39
2.5 Висновки до розділу 2	42
3 ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	43
3.1 Передумови для розробки проєкту міні-СЕС	43
3.2 Система вуличного освітлення з живленням від міні-СЕС	43
3.3 Дослідження характеристик фотоелектричних систем	46
3.4 Розрахунок числа та потужності сонячних панелей міні-СЕС	49
3.5 Визначення кількості акумуляторних батарей та їх ємності	52
3.6 Розробка інтелектуального світильника	55
3.7 Висновки до розділу 3	58
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	59
4.1 Аналіз шкідливих і небезпечних факторів, які можуть виникнути при монтажі й експлуатації сонячної установки	59
4.2 Розрахунок струму при одно- і двохполюсному дотику до струмо- провідних частин сонячної установки	60
4.3 Заходи безпеки життєдіяльності для захисту працівників	62
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	68

ВСТУП

Актуальність теми. В більшості випадків для улаштування своєї життєвої діяльності, задоволення певних потреб людство створювало, удосконалювало та розвивало різноманітні типи виробництва. Розробка паливного двигуна, а потім і електричної машини, у свій час ознаменувало значну подію у розвитку енергетики. Ця подія відкрила шлях у сучасний стан електроенергетики, як складається з електростанцій, що використовують для роботи різне викопне паливо.

Але останні десятиліття, навіть попри доволі стійкі перспективи класичної енергетики, яка працює на викопному паливі, у досить швидкому темпі почали проявлятися її негативні аспекти - забруднення навколишнього середовища при швидкому зменшенні відносно легких в доступі запасів газу, вугілля та нафти. Згідно статистичних даних ЮНЕСКО, якщо зберігати теперішні тенденції споживання усіх загальних запасів викопного палива, то його може вистачити приблизно на 100 років [1].

Тому є природнім, що людство пробує зреагувати на виниклі проблеми та висуває деякі рішення щодо їх подолання. Зокрема, було запропоновано підходи до впровадження термоядерних реакцій з метою забезпечення людства енергією на майбутні тисячоліття. Але цей підхід не вирішує екологічних проблем, які ще більше зростають у зв'язку з проблемами зберігання радіоактивних відходів, а також ризиком аварій на атомних електростанціях. Отже, можна зробити висновок, що впровадження атомної енергії не позбавляє людство проблем з енергозабезпеченням [2].

Сьогодні багато країн світу доволі значну увагу сконцентровує на відновлюваних джерелах енергії, акцентуючи дослідження на можливостях використання сонячної енергії, енергії вітру, річок, припливів, біологічного палива та інших відновлюваних джерел енергії, які існують в природі в натуральному стані та не несуть екологічних проблем і є невичерпними внаслідок своєї відновлюваності [3]. Практичне впровадження різних джерел електричної енергії на базі використання відновлюваних джерел енергії розгортає

можливості створювати системи будь-якої складності, які не будуть залежні від системи централізованого енергопостачання (рис. 1).

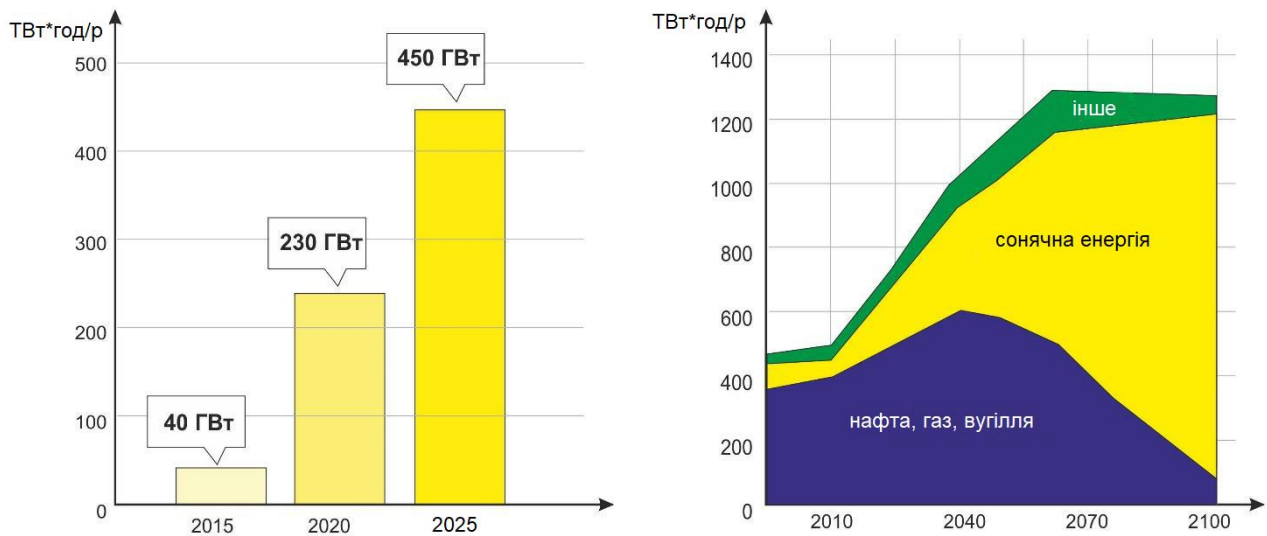


Рисунок 1 – Генерація електричної енергії від енергії Сонця

Але також відомо, що однією з невирішених проблем відновлюваної енергетики є її волатильність, тобто непостійність вироблення електроенергії при допомозі генеруючих установок. Зокрема, цю проблема в більшості відносять до вітрових та сонячних енергетичних систем, які, на відміну від гідроенергетичних систем, можна використовувати в якості незначної генерації для малих підприємств та ізольованих (автономних) систем електропостачання.

Система вуличного освітлення, що розглядається в кваліфікаційній роботі, як і всі інші системи освітлення загалом, має одну важливу особливість - використання електроенергії в нічний час доби, коли використовувати енергію Сонця нема можливості. Саме з цієї причини, більшість систем освітлення з метою збільшення ефективності, крім сонячних панелей, мають в своєму складі вітрогенератор (рис. 2). Це дозволяє використовувати для вироблення електроенергії відразу два незалежні відновлювані джерела – сонце та вітер. Таким чином, за умови застосування накопичувача енергії достатньої ємності, вирішується проблема непостійності вироблення електроенергії та забезпечення роботи освітлювальної установки у темний час доби.

Попередні дослідження застосування енергії сонця та вітру для систем

освітлення дозволили зробити висновок про те, що вітрогенератори досить рідко використовуються в населених пунктах. Порівняння сонця і вітру як відновлюваних джерела енергії дозволили зробити висновок про те, що в енергії Сонця в даний час є ряд істотних переваг перед вітром. Головна перевага полягає у тому, що запаси вітрової енергії в Україні достатні, проте, перебувають вони переважно в гірській місцевості та в прибережних водах морів. Саме там, на значній відстані від населених пунктів, від вітрових електростанцій буде максимальна віддача, і інфразвуковий шум від них не впливатиме на здоров'я людей [4].



Рисунок 2 – Вітровий генератор

Важливим також є і те, що вартість одиниці потужності вітрогенератора майже в 2 рази більша за потужність, що отримується від сонячної електростанції. Ще одним недоліком вітрогенераторів є різке зниження ефективності, коли швидкість вітру опускається нижче 4-5 м/с. При цьому, у сонячної електростанції, наприклад, у похмурий день, можна компенсувати недостачу потужності за рахунок збільшення числа сонячних модулів, в той час як проблема збільшення потужності вітрогенератора при відсутності вітру поки не має рішення [5].

Численні спостереження показують, що сила вітру протягом доби може

коливатись у досить великих межах і ці коливання можуть бути непрогнозованими, а повна відсутність вітру може тривати більше доби. Такі характеристики енергії вітру прямо протилежні характеристикам енергії Сонця, яка один раз з'являється і зникає строго в певний час доби. Таким чином, отримання електричної енергії від відновлюваних джерел енергії в населених пунктах (особливо в густонаселених) з високими будівлями або спорудами, найбільш доцільно та вигідно на основі використання енергії Сонця, а не енергії вітру.

У зв'язку з цим, при створенні систем вуличного освітлення в населених пунктах, необхідно вирішити досить складне завдання, яке пов'язане головним чином з тим, що така система має бути максимально ефективною, і водночас мати мінімальну собівартість при заданих відповідно до санітарних норм і правил параметрів. Стан систем вуличного освітлення в невеликих містах і, особливо, в сільських населених пунктах, а також проблеми, що виникають при створенні умов комфортного середовища для проживання, роблять цю кваліфікаційну роботу *актуальною*.

Мета і завдання досліджень. Метою кваліфікаційної роботи є:

- дослідження використання енергії Сонця для систем вуличного освітлення;
- розробка інтелектуальних та економічних елементів освітлювальних установок;
- експериментальні дослідження одиничної системи освітлення з використанням інтелектуальної системи керування зовнішнім освітленням;
- розробка ефективної системи вуличного освітлення з живленням від сонячної міні-електростанції.

Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні завдання:

- вивчено загальні принципи роботи, будови, географічних та кліматичних умов розміщення фотоелектричних систем;
- досліджено основні вимоги до існуючих систем вуличного освітлення та їх характеристики;

- розглянуто технічні характеристики основних елементів, які необхідні для побудови ефективних систем вуличного освітлення;

- на основі отриманих експериментальних досліджень виконано розрахунок міні-сонячної електростанції для системи вуличного освітлення, та підібрано для її побудови відповідне обладнання.

Об'єктом дослідження є автономна сонячна міні-електростанція для потреб територіальних громад України.

Предметом дослідження є отримання сонячної електроенергії для вуличного освітлення населених пунктів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в запропонованих заходах використання альтернативної електричної енергії та технічному обґрунтуванні розробки сонячної міні-електростанції для системи вуличного освітлення, що дозволяє підвищити ефективність енергозабезпечення для територіальних громад України.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає у тому, що впровадження та експлуатація сонячної міні-електростанції передбачає зменшення споживання електроенергії і викидів в оточуюче середовище вуглекислого газу, а результати досліджень та розроблена міні-електростанція можуть бути впроваджені в практичну діяльність територіальних громад України.

Апробація результатів кваліфікаційної роботи.

Основні положення роботи і її результати доповідалися на Міжнародній науково-технічній конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя, травень 2025 р. (м. Тернопіль).

Публікації.

За результатами виконаних досліджень опубліковано 1 тезу доповідей «Розробка пристрою вирівнювання в розподільних електромережах напругою 0,4 кВ». Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя: ТНТУ, 2025.- С. 49-50

Структура роботи.

Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (37 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини: 71 сторінка, 8 таблиць, 30 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Розподіл сонячного випромінювання над поверхнею Землі

Величина сонячного випромінювання, що попадає на поверхню Землі, не є постійною внаслідок руху Землі навколо Сонця та своєї осі. Кількість енергії, що попадає на Землю, має залежність від пори року та часу доби. В більшості випадків в середині дня Земля отримує найбільше сонячної радіації, якщо порівнювати з ранковим часом чи вечірнім часом. В середині дня Сонце знаходиться у зеніті і відстань шляху проходження сонячних променів крізь атмосферу Землі є коротшим. В результаті менша кількість променів Сонця заломлюється і відбивається, відповідно більшу кількість сонячного випромінювання отримує поверхня Землі.

Величину сонячної енергії, яку отримує одиниця площі в одиницю часу, має залежність від декількох факторів: широти і клімату території, пори року, кута нахилу поверхні Землі стосовно до Сонця. Також величина сонячної енергії, що попадає на поверхню Землю, може відрізнятися від середньорічного показника: зимою є меншою на $0,8 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ на день в північній частині Європи та більшою на $4 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ на день літом час на цій території. Різниця показників може зменшуватися при наближенні до екватору [6].

Величина сонячної енергії може також залежати від географічного положення території: вона зростає з наближенням до екватора. Наприклад, згідно статистичних даних середньорічна сумарна сонячна енергія, що випромінюється на горизонтальну поверхню Землі, становить (рис. 1.1):

- в Україні, у Центральній Європі та Середній Азії біля $1000 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$;
- у районі Середземномор'я біля $1500 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$;
- у значній частині пустинь Африки, Близького Сходу та Австралії біля $2200 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$.

Отже, величина сонячної енергії може суттєво відрізнятися в залежності від пори року та географічного положення території [7].

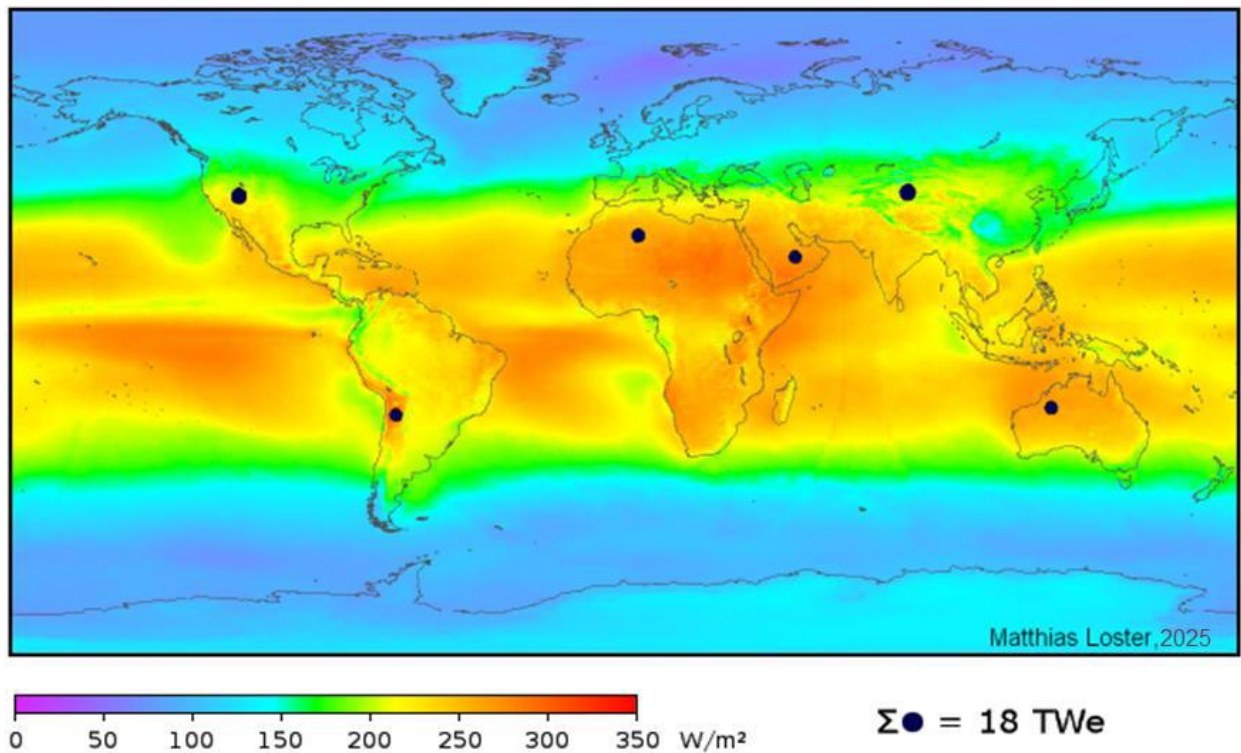


Рисунок 1.1 – Схема розподілу сонячної радіації над поверхнею Землі

Згаданий фактор має суттєвий вплив при виконанні розрахунку ефективності використання електричних станцій, які використовують у своїй роботі сонячні батареї.

Густина сонячної радіації в Україні є дещо вищою, ніж у деяких європейських країнах. Україна володіє великою територією і не завжди може здійснити підведення електричної енергії до окремих об'єктів. Тому значно зростає зацікавлення щодо впровадження автономних електричних станцій та джерел аварійного безперебійного енергопостачання, які можуть отримувати живлення від енергії Сонця.

Зацікавленість щодо впровадження сонячних електричних станцій стрімко почало зростати на фоні постійного зниження вартості сонячних елементів, виробництво деяких із них започатковано уже в Україні. Ціна устаткування, висока екологічність та низькі витрати на експлуатацію (вони постійно знижуються), висувають автономні сонячні електростанції в якості оптимального вибору для багатьох об'єктів на території України [7].

1.2 Особливості клімату на території Західної України

В основному в більшості випадків на території Західної України поширений континентальний клімат (рис. 1.2). До винятку відносяться території, що знаходяться в гірській місцевості. Більшість років на території Західної України є достатня кількість тепла, тому в основному її населення розселено рівномірно, крім гірських районів. Характеристики даного клімату виражаються відносно теплою зимою, і тривалим та часто спекотним літом. Температура взимку в максимальній позначці може іноді опускатись до -20°C , а влітку може досягати $+40^{\circ}\text{C}$.

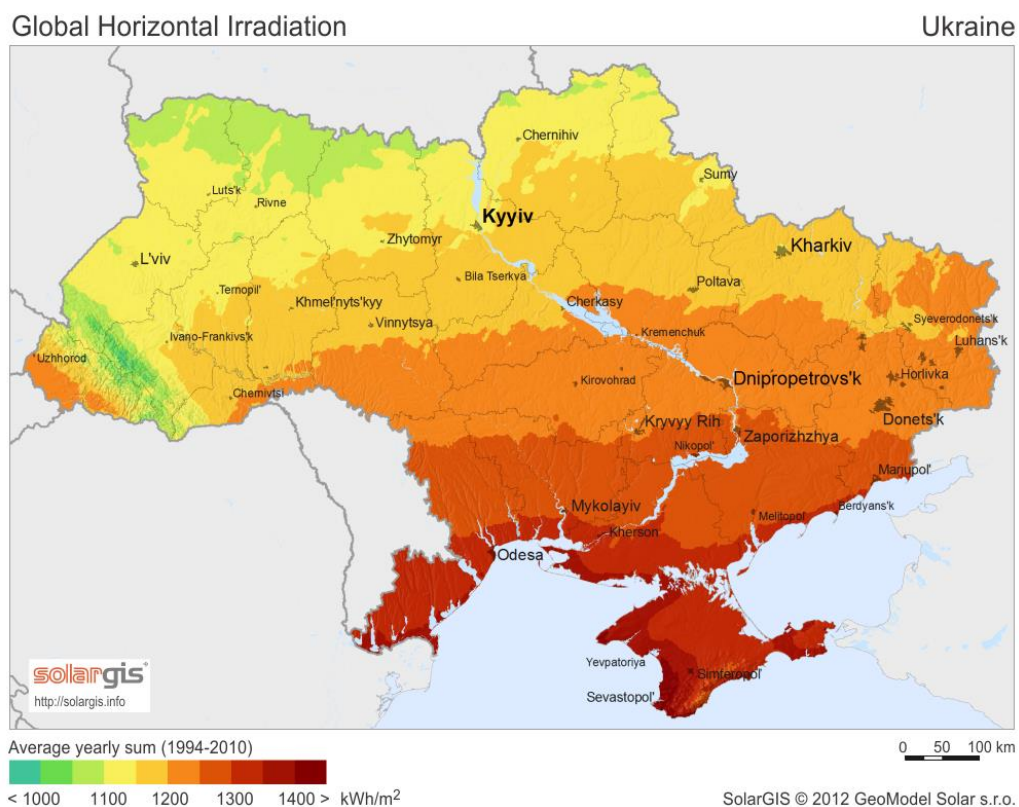


Рисунок 1.2 - Надходження сонячної радіації на територію України

Максимальні температури, які не часто мають місце, тривають від декількох днів до одного-двох тижнів і можуть забезпечити перепад температур між літом і взимку до 60°C . Такі коливання температури протягом року є короткочасними і не висувають особливих вимог до системи життєзабезпечення будівлі, конструкцій та будівельних матеріалів [9]. Клімат Західної України

не вимагає особливих інженерних та технічних рішень для забезпечення їх довговічності, економії енергії, комфортних умов та доступних цін.

При встановленні світильника з живленням від сонячної батареї необхідно врахувати наступні фактори: рівень сонячного випромінювання, кількість сонячних днів в році, тривалість освітлення системи у темний час доби. Рівень сонячного випромінювання та тривалість освітлення у темний час доби напряму пов'язана з географічною широтою території, але в загальному випадку визначається і кліматичними умовами.

Беручи до уваги те, що в Західній Україні доволі помірний клімат з м'якою зимою, то регіон має достатню кількість сонячних днів. Тривалість сонячного випромінювання становить більше однієї третьої частини року і цей доволі сприятливим фактором для використання Сонця у якості альтернативного джерела електричної енергії. На рис. 1.3 приведені дані PVgis щодо середнього видобутку електричної енергії з 1 кВт потужності СЕС в Західній Україні за місяцями [10]. Ще одним важливим параметром є кількість розподіленого сонячного випромінювання на 1 м² і у табл. 1.1 приведено дані, зокрема, по м. Тернопіль. З показників таблиці видно, що основне надходження сонячного випромінювання зазвичай припадає в основному на літні місяці, а місяця листопада по місяць лютий можна спостерігати дефіцит сонячної енергії.

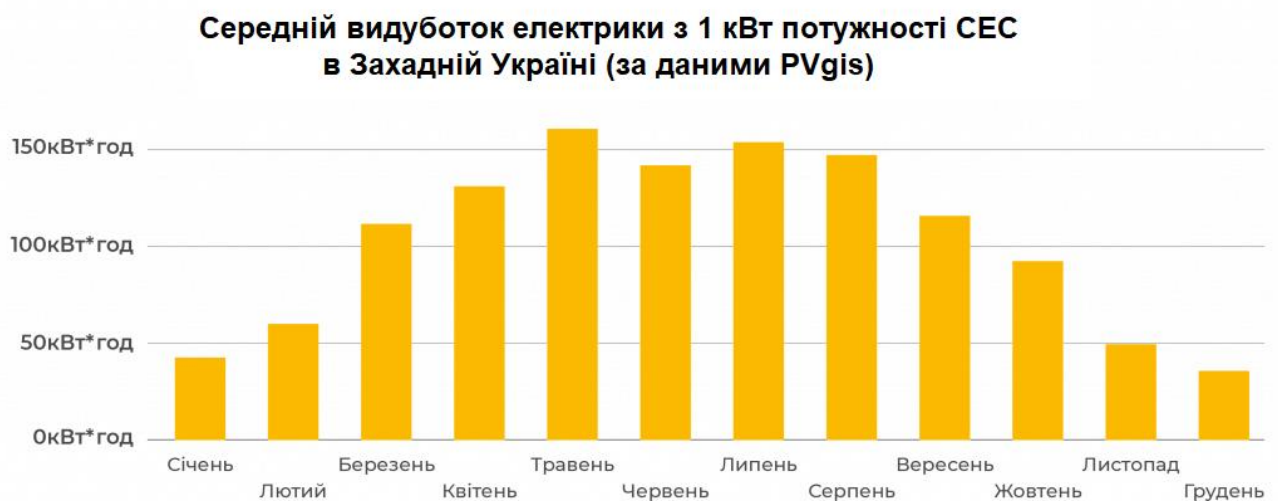


Рисунок 1.3 - Отримання електроенергії від СЕС в Західній Україні

Таблиця 1.1 – Надходження сонячного випромінювання за місяцями (МДж/м²)

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Всього за рік
Терно- піль	17 6	28 2	51 2	68 5	87 4	93 7	90 2	75 7	53 2	36 3	16 6	16 1	6347

Аналізуючи приведені дані, бачимо, що загальна кількість сонячного випромінювання в Західній Україні є достатньо, знаходиться приблизно на тому ж рівні, що і в центральних і східних регіонах України, де кліматичні умови майже не відрізняються, а зимові температури рідко опускаються показника нижче -10-15 °С.

Отже бачимо, що представлені дані, показники сонячної радіації є цілком достатніми для ефективного застосування сонячних фотоелементів на території Західної України.

1.3 Енергоустановки на базі відновлюваних джерел енергії

Автономні енергетичні установки використовуються для забезпечення різноманітними видами енергії (електрика, тепло, холод) прямим шляхом споживачів (окремі будівлі чи невелика група будівель). Автономні енергетичні установки, що працюють на відновлюваних джерела енергії (ВДЕ), мають деякі особливості, що дозволяють відрізнити їх від класичних стаціонарних систем електропостачання, реалізованих на стандартних методах [11]. Базові складові автономної енергоустановки на основі ВДЕ представлено на рис. 1.4.



Рисунок 1.4 - Автономна енергоустановка на базі ВДЕ

Ідея автономної представленої енергоустановки спрощена з наступних міркувань.

Спосіб 1. Для забезпечення більшої ефективності системи вироблена енергія буду направлятися до споживача.

Спосіб 2. У періоди генерації надлишкової енергії вона запасається системою акумулювання.

Спосіб 3. При недостатчі виробленої енергії за допомогою первинного джерела, запасена енергія від вторинних джерел буде направлятися до споживача для покриття наявного дефіциту.

Первинними джерелами автономної енергоустановки є поновлювані джерела: міні-гідроелектростанція (міні-ГЕС), вітроенергоустановка (ВЕУ), фотоелектричні перетворювачі (ФЕП). Вироблення енергії ВДЕ суттєво залежить від кліматичних умов експлуатації, а основні технічні показники електричної або теплової енергії, що генеруються первинними ВДЕ - вид електричного струму, його частота та величина вихідної напруги - є різними. Крім того, режим вироблення енергії ВДЕ, як правило, суттєво не збігається з графіками споживання енергії, який, в загальному випадку, потребує електроенергії, теплової енергії, а в ряді випадків і холоду [12].

Таким чином, ефективна робота та енергобаланс автономної енергоустановки визначається співвідношенням зміни енергетичного балансу ВДЕ та графіка електричного навантаження системи у споживача.

Під час координації роботи автономної енергетичної установки на базі ВДЕ та споживача потрібно вирішити наступні задачі:

- як максимально використати поновлювані енергоресурси;
- як розподілити вироблену і споживану енергію, що вимагає здебільшого підключення до енергосистеми акумуляторних батарей;
- регулювання параметрами енергії, що генерується.

Для вирішення цих задач застосовуються такі схемні рішення автономних енергоустановок (рис. 1.5).

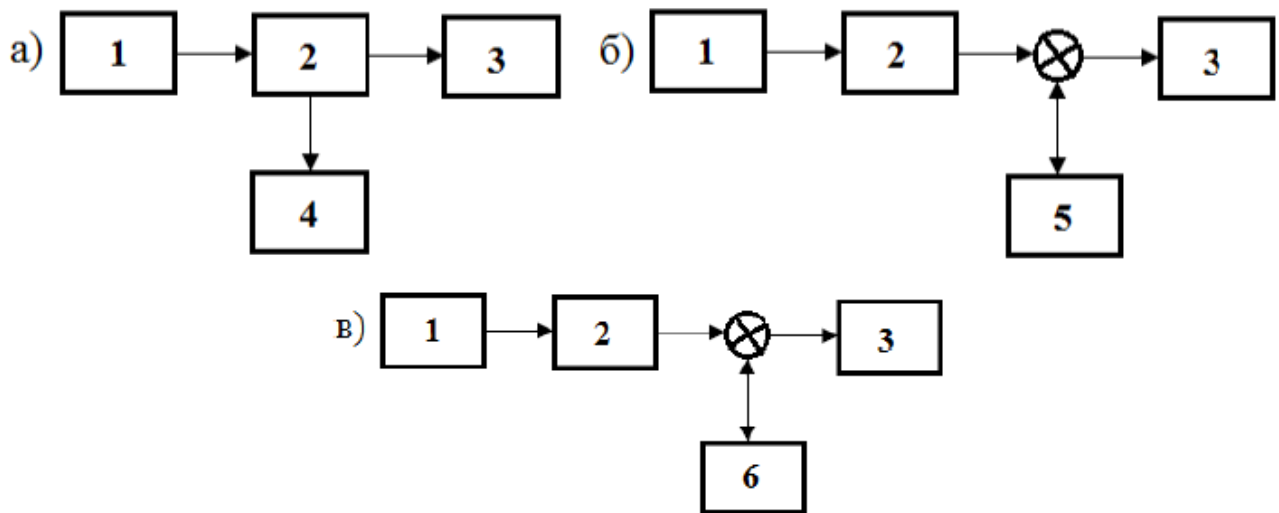


Рисунок 1.5 – Схеми узгодження ВДЕ із споживачами: а) скидання енергії; б) накопичувачем енергії; в) регулювання навантаженням 1 – ВДЕ; 2 – перетворювач енергії; 3 – споживач; 4 – скидання у довкілля; 5 – накопичувач; 6 – регулятор

Перша система (рис. 1.5, а) – система зі скиданням енергії. Цей спосіб узгодження потужностей ВДЕ та споживачів є найпростішим. У цій системі використовується лише частина потенціалу ВДЕ для енергозабезпечення поточного значення навантаження споживача. Такі системи застосовуються в міні-ГЕС, системах сонячного обігріву, різних вітроустановках та ін.

Друга система (рис. 1.5, б) – система із накопичувачами енергії. У цій системі надлишки енергії, що генерується ВДЕ, у порівнянні з потребами споживача, акумулюються і можуть жити систему при нестачі потенціалу ВДЕ. Дані системи дозволяють найбільш ефективно використовувати ВДЕ та застосовуються практично у всіх автономних енергоустановках на основі ВДЕ.

Третя система (рис. 1.5, в) – система регулювання навантаження. За допомогою автобаласних систем відбувається регулювання. Ця система забезпечує найповніше використання первинних ВДЕ.

Також тільки автоматичні системи управління дозволяють при перетворенні первинної енергії ВДЕ, акумулювання, перетворення та вторинної генерації енергії найбільш повно та ефективно задовольнити потреби споживача.

Таким чином, автономна ефективна енергоустановка на основі ВДЕ повинна включати автоматичну систему керування, яка дозволить, з одного боку регулювати режим роботи установки з урахуванням кліматичних умов експлуатації та характеристик використовуваного устаткування, з іншого боку - узгоджувати режими вироблення енергії з урахуванням змінних графіків споживання [13].

Автономні системи енергопостачання влаштовані таким чином, що в умовах різної інтенсивності сонячного випромінювання енергія сонця перетворюється на електричну енергію, і накопичується в акумуляторних батареях для подальшого використання при необхідності. Природно, для систем електричного освітлення, які працюють у темний час доби, період накопичення електроенергії на протязі світлового дня є дуже важливим періодом. Отримання інформації про інсоляцію (інтенсивність сонячної радіації) у конкретній географічній та кліматичній зоні, дає уявлення про можливість використання енергії сонця для отримання певної кількості електроенергії. Ця кількість, протягом року (табл. 1.1), може бути максимальною влітку, і мінімальною взимку. Це важливий параметр при розрахунку СЕС будь-якого типу, але не менш важливим є параметр, що характеризує ефективність фотоелектричного перетворювача.

1.4 Аналіз контролерів заряду та принципу їх роботи

Контролер заряду – важливий елемент СЕС будь-якого типу. У системах, де не використовуються накопичувачі електроенергії (акумуляторні батареї), контролери, яких може бути більше одного, вбудовані в інвертор. Тобто, енергія Сонця, за допомогою всього двох складових частин СЕС, сонячних батарей і мережевого інвертора, відразу перетворюється на змінний електричний струм. У системах з акумуляторними батареями контролери заряду відводиться ще більш важлива роль. Саме від роботи залежить термін служби акумуляторних батарей [14].

Найбільшого поширення в сонячній енергетиці набули два типи контролерів: PWM та MPPT.

Контролери технології PWM (Pulse Width Modulation) для регулювання зарядного струму використовують широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ).

Режими роботи контролера PWM представлені у графічному вигляді на рис. 1.6.

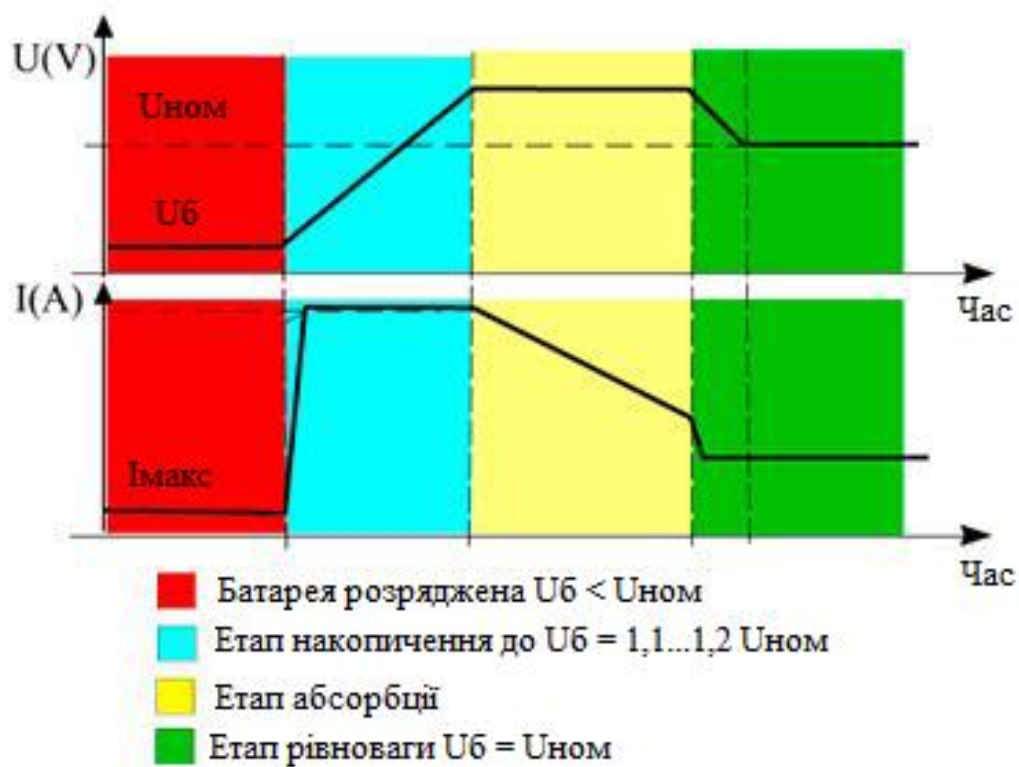


Рисунок 1.6 – Графіки роботи контролера PWM

Цей тип контролерів має кілька стадій заряджання акумуляторної батареї. На першій стадії розряджений акумулятор заряджається можливо максимальним струмом, що для СЕС дуже важливо через нестабільність сонячного випромінювання і його повну відсутність у нічний час.

Далі включається ШІМ, напруга зростає (акумулятор інтенсивно заряджається), а струм утримується на певному рівні, що запобігає кипінню електроліту, не допускаючи передчасний вихід акумуляторних батарей з ладу. Коли значення напруги на клеммах акумулятора досягає певного рівня, включається так званий заряд вирівнювання (етап абсорбції). Сила струму поступово

зменшується, що також запобігає газоутворенню в акумуляторі та його перегріву.

Остання стадія – підтримання заряду (етап рівноваги). При повному заряді акумулятора напруга підтримується на оптимальному рівні, що необхідно для компенсації саморозряду та споживання мінімальної потужності на власні потреби СЕС (живлення електронних схем).

Контролери технології Maximum Power Point Tracker (MPPT) – це контролери, що сканують ВАХ (вольт-амперна характеристика) сонячних батарей у пошуку так званої точки максимальної потужності [15]. На рис 1.7 представлений графік, що пояснює принцип роботи MPPT контролера.

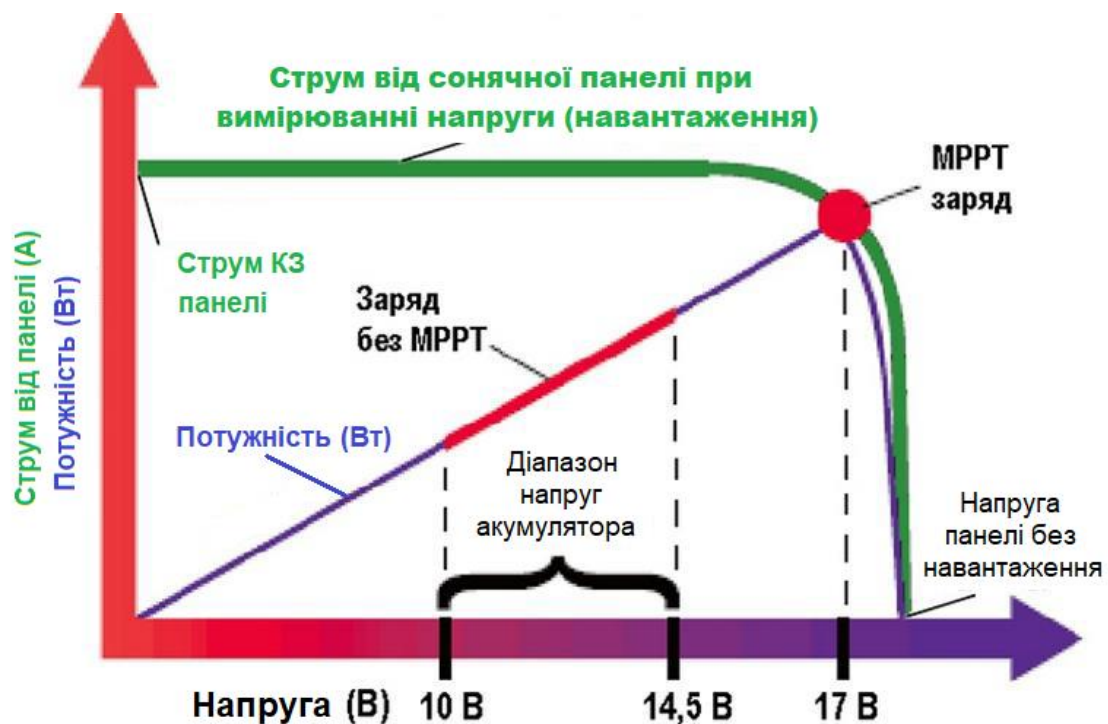


Рисунок 1.8 – Переваги MPPT контролера у порівнянні з PWT

Таким чином, для побудови ефективних СЕС, доцільно застосовувати контролери MPPT, оскільки вони дозволяють використовувати максимум електроенергії, що виробляється сонячними батареями.

На рис 1.8 представлені найпоширеніші типи PWT та MPPT контролерів.



Рисунок 1.8 – Контролери PWM (10 A) та MPPT (30 A)

1.5 Аналіз накопичувачів електричної енергії

Акумуляторні батареї є важливою частиною обладнання сонячної електростанції, особливо якщо навантаження підключається у темну пору доби, коли повністю відсутнє вироблення електроенергії. Тобто, наприклад, вдень, коли Сонце має максимальну інтенсивність випромінювання, сонячні батареї виробляють значну кількість електроенергії, якої може бути навіть більше, ніж необхідно споживачам, яких забезпечує електрикою СЕС. Але, вночі, коли саме потрібне освітлення, а сонячні батареї не працюють, використовується електроенергія, накопичена в акумуляторах.

Від числа акумуляторних батарей залежить їх загальна ємність, а, отже, і потужність СЕС. Для збільшення ємності системи використовується три способи з'єднання акумулятора: послідовне, паралельне та послідовно-паралельне (рис. 1.9).

При паралельному з'єднанні ємності всіх батарей сумуються, а загальна напруга залишається такою самою, як напруга в одному пристрої. При послідовному з'єднанні навпаки напруга підсумовується, а ємність залишається рівною ємності однієї батареї. Найбільш ефективним є комбіноване з'єднання, при якому підсумовуються і напруга, і ємності. Але при послідовно-паралельному з'єднанні виникає висока ймовірність розбалансування, тобто сумарна напруга буде розрахунковою, а ось напруга кожного окремого акумулятора

буде різнитися. В результаті частина батарей буде недозаряджена, а частина навпаки, перезаряджена, що призведе до більш інтенсивного падіння ємності всіх акумуляторів [16]. Тому, при послідовно-паралельному з'єднанні необхідно встановлювати спеціальний пристрій - балансир.

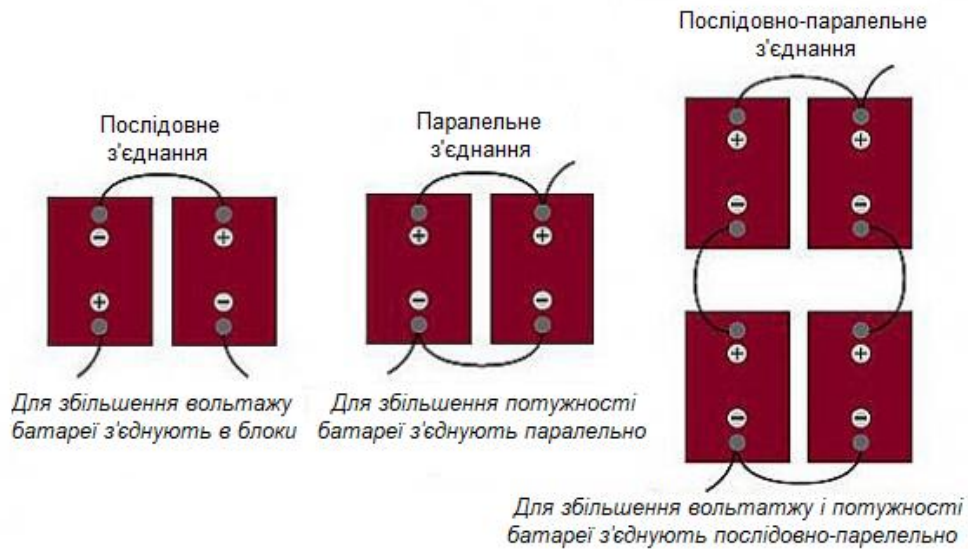


Рисунок 1.9 – Схеми з'єднання акумуляторних батарей

Для балансування свинцево-кислотних акумуляторних батарей одного балансира достатньо для балансування двох послідовно з'єднаних батарей. Принцип роботи балансування полягає в автоматичному вирівнюванні напруги на клеммах акумуляторів. Процесом балансування керує спеціальна електронна схема. Процес балансування двох послідовно з'єднаних акумуляторних батарей представлений на рис. 1.10.

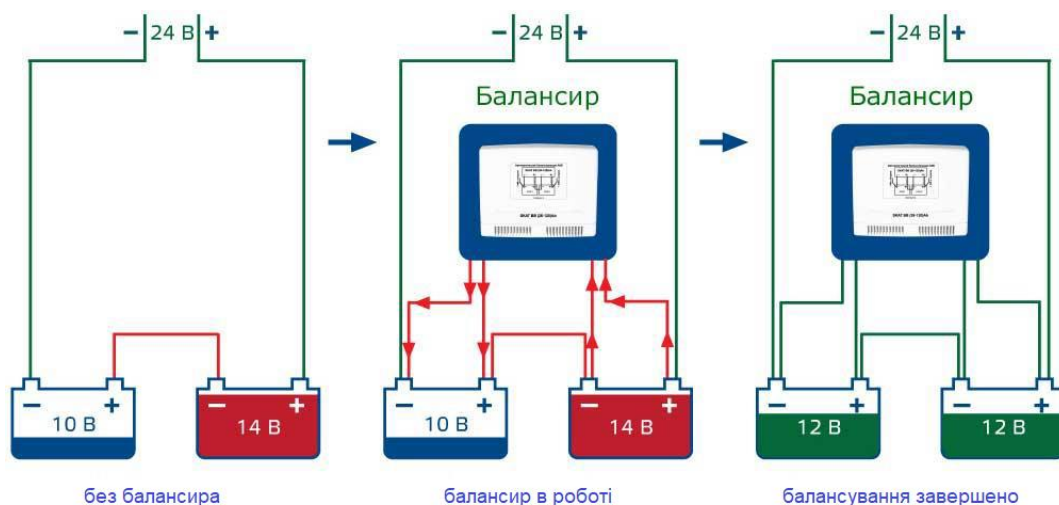


Рисунок 1.10 – Процес балансування двох акумуляторних батарей

Акумуляторні батареї у складі СЕС повинні задовольняти цілій низці вимог, зокрема вони мають витримувати велику кількість циклів *заряд-розряд*. При розрахунку параметрів акумуляторної батареї необхідно враховувати втрати енергії під час її зберігання та перетворення (табл. 12). Звичні автомобільні акумулятори не витримують велику кількість циклів і мають значний саморозряд.

Найчастіше для СЕС використовуються спеціальні акумуляторні батареї.

До таких відносяться AGM-акумулятори, в конструкції яких електроліт знаходиться у зв'язаному стані між абсорбуючими пластинами зі скловолокна. Завдяки цьому акумулятор може експлуатуватися в будь-якому положенні, витримуючи до 500 циклів при глибині розряду до 50%. Термін експлуатації акумуляторів AGM – близько 5 років, а діапазон робочих температур обмежений -25°C [17].

Гелева акумуляторна батарея може працювати також у будь-якому положенні. Основна перевага конструкції даних акумуляторів полягає в тому, що желеподібний електроліт утримується в порах силікагелю і електроди не обсипаються через те, що весь вільний простір заповнений гелем. Крім того, акумулятори цього типу витримують глибоку розрядку і відносно велику кількість циклів у порівнянні з акумуляторами AGM. Термін служби гелевих акумуляторів сягає 10 років.

Таблиця 1.2 – Стан заряду акумулятора

Ступінь зарядженості батареї, %	ЕРС батареї (В) при температурі		
	+20...+25°C	+5...-5°C	-10...-15°C
100	12,70-12,90	12,80-13,00	12,9-13,10
75	12,55-12,65	12,65-12,75	12,75-12,85
50	12,20-12,30	12,30-12,40	12,40-12,50
25	12,00-12,10	12,10-12,20	12,20-12,30
0	11,70-12,00	11,80-12,00	11,90-12,10

1.6 Висновки до 1 розділу

В цьому розділі кваліфікаційної роботи було розглянуто питання розподіл сонячного випромінювання над поверхнею Землі для визначення його вплив при виконанні розрахунку ефективності використання електричних станцій.

Також було проаналізовано особливості клімату на території Західної України і встановлено, що представлені дані, показники сонячної радіації є цілком достатніми для ефективного застосування сонячних фотоелементів на цій території.

Аналіз енергоустановок, робота яких базується на відновлюваних джерелах енергії показав, що така автономна ефективна енергоустановка повинна включати автоматичну систему керування для регулювання режиму роботи установки з урахуванням кліматичних умов експлуатації та характеристик використовуваного устаткування, а також узгодження режиму вироблення енергії з урахуванням змінних графіків споживання.

Також було виконано аналіз контролерів заряду і принципу їх роботи та накопичувачів електричної енергії з метою вибору оптимальних варіантів для реалізації поставленої задачі в кваліфікаційній роботі.

2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Дослідження фотоелектричних перетворювачів і принципу роботи сонячних батарей

Принцип роботи фотоелектричного перетворювача можна пояснити з прикладу перетворювачів з р-п-переходом, що виникає у неоднорідних структурах напівпровідників при впливі на них сонячної радіації. Електронно-дірковий перехід формується в процесі легування пластинки напівпровідникового монокристалічного матеріалу з одним із типів провідності (р- або n-типу) з допомогою домішки для забезпечення утворення поверхневого шару, що має провідність протилежного типу. Кількість легуючої домішки у цьому шарі має бути набагато більшою, ніж кількість домішки базовому матеріалі з метою нейтралізації наявних там основних вільних носіїв заряду та створення провідності протилежного знаку [18].

На сьогоднішній день практично кожен споживач може зібрати своє незалежне джерело електроенергії на основі сонячних батарей (у науковій літературі їх називають фотоелектричними панелями).

Витрати на дорогі пристрої з часом покриваються можливістю використання безкоштовної електроенергії. Ще одна важлива деталь: сонячні батареї – це екологічно чисте джерело енергії. В останні роки суттєво знизилася ціна фотоелектричних панелей (в десятки разів) і ця тенденція продовжується, що дозволяє розмірковувати про неймовірні перспективи використання ФЕП.

У стандартному вигляді джерело чистої електроенергії складатиметься з наступних пристроїв: сонячної батареї (генератор постійного струму), акумуляторної батареї з контролером заряду та інвертора для перетворення постійного струму на змінний струм.

На даний відомі два основних типи фотоелектричних перетворювачів: вихідним матеріалом для виготовлення одних є монокристалічний кремній, для інших - полікристалічний (рис. 2.1). Відмінності одних елементів від інших полягають у технології виробництва та коефіцієнті корисної дії. У монокрис-

талічних коефіцієнті корисної дії досягає 17,5%, а у полікристалічних – 15% [19].



Рисунок 2.1 – Фотоелемент з монокристалічного кремнію (ліворуч) та фотоелемент із полікристалічного кремнію (праворуч)

Принцип роботи сонячного елемента заснований на тому, що в напівпровідниковій (з кремнію) пластині під дією сонячного світла виникає електричний струм. Тобто при потраплянні сонячних променів на напівпровідник енергія

променів поглинається, а приплив цієї енергії вивільняє електрони всередині напівпровідника. У фотоелементі виникає електричне поле, що сприяє вивільненню електронів і змушує їх здійснювати рух у певному напрямку. Цей потік електронів і утворює, зрештою, постійний електричний струм.

Зрозуміти процес вивільнення електронів допоможе кремній. В атомі кремнію 14 електронів у трьох оболонках, з яких перша повністю заповнена двома електронами, друга – вісьмома, а третя оболонка наполовину порожня – вона має лише 4 електрони.

Завдяки такому розподілу електронів у кремнію кристалічна форма, заповнюючи порожнечі у третій оболонці, атоми кремнію «діляться» електронами із сусідами. Але кристал кремнію у чистому вигляді – малопровідний, тобто майже всі його електрони міцно пов'язані в кристалічній решітці.

Тому в сонячних батареях використовується кремній з невеликими домішками, тобто в кремнії присутні атоми інших речовин. На мільйон атомів кремнію припадає лише один атом іншої речовини, наприклад, фосфору. Фосфор у зовнішній оболонці має п'ять електронів. Чотири з п'яти електронів утворюють кристалічні зв'язки із сусідніми атомами кремнію, один електрон залишається «підвішеним» у просторі, без наявних зв'язків з іншими атомами.

У випадку попадання на кремній сонячних променів додаткової енергії для електронів виявляється достатньо, щоб від'єднати їх від атома. У результаті на їх місці утворюються «дірки». Вивільнені електрони переміщуються кристалічною решіткою у якості носії електроструму. Якщо на їхньому шляху зустрічаються «дірки», то електрони заповнюють їх.

У чистому кремнії вільних електронів дуже невелика кількість завдяки міцним зв'язкам атомів у кристалічній решітці. Але якщо використовувати кремній з домішкою фосфору, то для вивільнення незв'язаних електронів потрібно буде додати меншу енергію.

Для отримання електрики можна використовувати більшу частину вільних електронів. Для покращення хімічних та фізичних властивостей різних речовин існує процес легування додавання домішок.

Збагачений атомами фосфору кремній трансформується в електронний напівпровідник *n*-типу. Легування так само буває бором, який має лише три електрони у верхній оболонці. В результаті одержують напівпровідник *p*-типу, в якому з'являються вільні позитивно заряджені "дірки".

Якщо з'єднати напівпровідник *n*-типу і напівпровідник *p*-типу, то у першому утворюється багато вивільнених електронів, тоді як у другому – багато «дірок». Електрони прагнуть якнайшвидше заповнити «дірки», проте якщо це станеться, то обидва напівпровідники стануть електрично нейтральними.

Насправді при проникненні вільних електронів у напівпровідник *p*-типу область на межі обох напівпровідників заряджається, утворюється бар'єр, який складно подолати. В області *p-n*-переходу утворюється електричне поле.

Кремній має властивість досить добре відбивати світло, отже, більшість фотонів пропадає. Для зменшення втрат, фотоелементи покривають покриттям антивідблиску. Покриття зі скла захищає сонячну батарею від дощу та вітру [20]. Основні елементи конструкції сонячної батареї представлені на рис. 2.2.



Рисунок 2.2 – Будова сонячної батареї

Ламінуючі плівки застосовують для загальної герметизації елементів батареї та їх щільного притискання до скла (без повітряних зазорів) для того, щоб усувати додаткове заломлення променів світла та розсіювати потужність. Також герметизація дозволяє оберігати елементи батареї від можливих природ-них впливів та випадкової корозії.

З часом експлуатації від самих елементів панелі залежить зменшення її потужності панелі (характеристики можуть не змінюватися, якщо це елементи Grade A), а пов'язано, переважно, від якості плівки для ламінування, тобто при довготривалому ультрафіолетовому опроміненні її прозорість може погіршитися. Отже, чим меншу кількість світла отримують сонячні елементи, тим меншу потужність видає панель.

Нижче наведено основні показники якості елементів у модулі, від яких залежать головні характеристики сонячної панелі.

Grade A — після прискореного тесту старіння (PID test) потужність елементів знижується лише на 5%, тобто. елементи, як і раніше, видають понад 95% своєї номінальної потужності.

Grade B — після прискореного тесту старіння (PID test) потужність елементів знижується лише на 30%, тобто. елементи, як і раніше, видають понад 70% своєї номінальної потужності.

Grade C - після прискореного тесту старіння (PID test) потужність елементів знижується більш ніж 30%, тобто. елементи починають видавати менше ніж 70% своєї номінальної потужності [21].

Кількість сонячних елементів можна визначити за номінальною напругою модуля. Кожний елемент певного розміру являє собою кремнієвий фотодіод з напругою в точці найбільшої потужності (біля 0,5 В). Стандартний модуль при номінальній напрузі 12 В має 36 елементів. При послідовному з'єднанні 36 елементів напругою по 0,5 В отримаємо 18 В в точці максимальної потужності. Якраз такою напругою потрібно заряджати акумулятор 12 В, оскільки для повноцінного заряджання напруга на акумуляторі повинна становити 14,2-14,9 В в залежності від типу акумуляторної батареї, але потрібно мати певний запас втрати в провідниках, нагрівання модуля і ін. [22]. Класичну схему з'єднання комірок сонячної панелі показано на рис. 2.3.

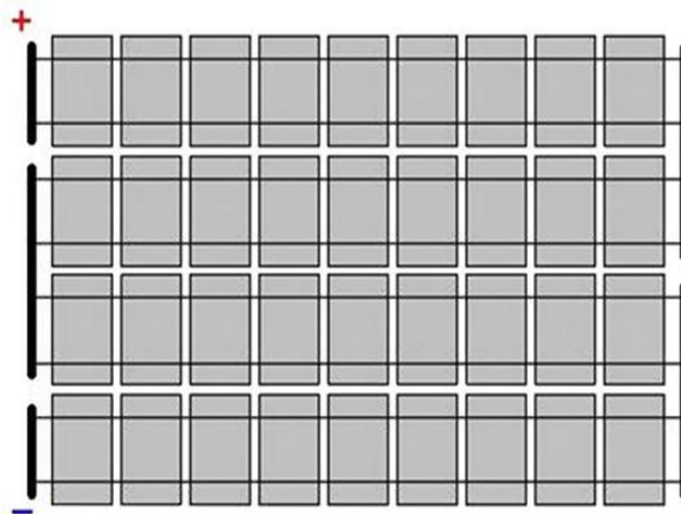


Рисунок 2.3 - З'єднання комірок сонячної панелі

Сонячна панель складається з окремих сонячних комірок, які з'єднуються паралельно та послідовно для збільшення вихідних параметрів (струму, напруги та потужності). Напруга на виході зростає при послідовному з'єднанні елементів, а при паралельному - вихідний струм. Поєднання способів з'єднання виконують тоді, коли потрібно збільшити значення струму і напруги. Також

при такому з'єднанні можна підвищити надійність, коли вихід з ладу одного сонячного елемента не викличе вихід із ладу всього кола елементів [23].

Максимальна величина струму, що тече від батареї, прямо пропорційна кількості паралельно включених, а ЕРС - послідовно включених сонячних елементів. Завдяки такій комбінації типів з'єднань збирається батарея із необхідними параметрами.

Послідовно з'єднані елементи утворюють одну гірлянду сонячної батареї, при цьому кожні дві гірлянди можуть бути зашунтованим діодами. Наприклад, коли в сонячній батареї є шість послідовно з'єднаних гірлянд, то, як правило, встановлюється три шунтуючі діоди (рис. 2.4).

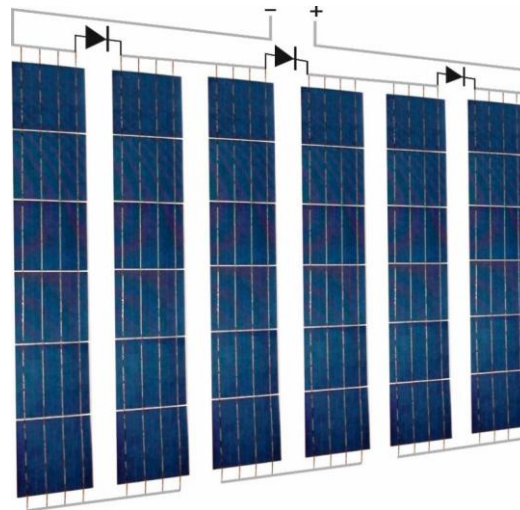


Рисунок 2.4 – З'єднання фотоелементів у сонячну батарею

Це необхідно для того, щоб при затемненні однієї з гірлянд або виникненні будь-яких несправностей в одному з елементів гірлянди струм у всьому послідовному колі зменшувався на незначну величину. Наприклад, при тимчасовому затемненні однієї гірлянди (або одного з елементів гірлянди) сонячної батареї, зображеної на рис. 2.2, тимчасово генеруватиметься вихідна потужність на $1/6$ менше, ніж при освітленні Сонцем всієї поверхні батареї без затемнень [22].

Діоди, які встановлюються в сонячних батареях, мають бути низькоомними для зменшення на них падіння напруги. У зв'язку з цим останнім часом для шунтування гірлянд елементів у сонячній батареї використовуються діоди Шоткі. Існує і більш ефективний варіант шунтуючого діода - це так званий

розумний зворотний діод SM74611 (рис. 2.5). Він має мінімальну розсіювану потужність, що дозволяє скоротити втрати до 80%, і здатний знизити температуру всередині розподільної коробки сонячної батареї на 50 °C в порівнянні з аналогічним по струму діодом Шоткі.

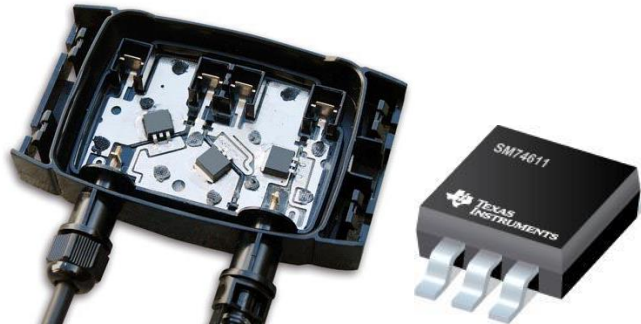


Рисунок 2.5 – Ефективний шунтуючий діод SM7461

Всі сонячні батареї, що випускаються в промислових масштабах потужністю від десятків до сотень ват, мають стандартні з'єднувальні роз'єми MC-4. Дані роз'єми можуть бути виконані для можливості з'єднання паралельних гілок масивів сонячних батарей з метою збільшення струму СЕС. Найбільш поширені варіанти роз'ємів сонячних батарей типу MC-4 представлені на рис 2.6 [24].



Рисунок 2.6 – Стандартні роз'єми сонячних батарей

З'єднання сонячних батарей між собою і підключення всього масиву до інших елементів СЕС здійснюється спеціальним проводом. Для сонячних систем розроблено спеціальний багатожильний провід, що має водостійку, стійку до високих температур та ультрафіолетового випромінювання ізоляцію. Перетин дроту має наступний ряд значень: 4 мм², 6 мм² та 10 мм². Провід розрахований на напругу 600-1000 В струм, залежно від перерізу, від 50 до 90 А і робочу температуру від -40 °C до +90 °C.

2.2 Розрахунок системи освітлення

Проведені дослідження показали, що системи електричного постачання з живленням від відновлюваних джерел електропостачання є максимально ефективними тільки у випадку окремого підходу до розв'язку конкретної задачі. Також такий підхід дозволяє значно економити фінансові кошти на певні проекти, так як виробники певного обладнання і його реалізатори для уникнення комерційних ризиків передбачають у ньому максимальний запас потужності та інших параметрів. Це можна пояснити тим, що сонячне випромінювання не є постійним як на протязі року, та і на протязі доби, тобто, система може добре проявити себе влітку і бути непотрібною взимку. Або така система на відмінно справляється з навантаженням у сонячну погоду та відмовити у тому випадку похмурої погоди на протязі декількох днів. Тому, розробляючи конструкцію сонячних систем, потрібно враховувати всі можливі режими та варіанти роботи, зокрема, закладати мінімум надійності при роботі в зимовий період, а в інші пори року система має демонструвати підвищену в декілька раз надійність, а це серйозний аргумент для кінцевої ціни всієї системи.

Для розробки ефективної та економічної системи вуличного висвітлення, було запропоновано інший підхід при вирішенні проблеми надійності.

Оскільки передбачається використовувати цю систему в малих населених пунктах сільської місцевості і там, де вона повністю відсутня, то є можливість зменшити вимоги санітарних норм і правил у сторону зниження яскравості покриття та горизонтальної освітленості. Також досягнути максимальну ефективність системи можна тільки при допомозі використання новітніх (інтелектуальних) технічних засобів, які можуть керувати режимами роботи і контролювати роботу всієї системи в автоматизованому режимі. Важливим моментом є те, що спроектована освітлювальна система на базі відновлюваних джерел електропостачання все обладнання розрахована на живлення 12-24 В (в окремих випадках 48 В). Це означає, що відповідно до вимог до проектування електричного освітлення та вимог електробезпеки воно не попадає до категорії електро-обладнання з напругою до 1000 В.

При виконанні проєкту зовнішнього освітлення населених пунктів у сільській місцевості дотримуються вимог санітарних норм і правил. Варто зазначити, що вимоги до вуличного та доржного освітлення у містах та сільських населених пунктах є суттєво різними [25]. У табл. 2.1 та 2.2. приведено зазначені норма.

Таблиця 2.1 - Центральні дороги та загальноміські вулиці

Інтенсивність руху транспорту, <i>од/год</i>	Яскравість покриття, <i>кд/м²</i>	Горизонтальна освітленість покриття, <i>лк</i>
Більше 3000	1,6	20
Від 1000 до 3000	1,2	20
Від 500 до 1000	0,8	15

Таблиця 2.2 - Районні та місцеві вулиці і дороги

Інтенсивність руху транспорту, <i>од/год</i>	Яскравість покриття, <i>кд/м²</i>	Горизонтальна освітленість покриття, <i>лк</i>
Більше 2000	1,0	15
Від 500 до 1000	0,6	10
Менше 500	0,3	4

Згідно статистичних даних містах з великим населенням, де спостерігається висока інтенсивність руху, приведені в табл. 2.1 норми освітленості, зазвичай, витримуються. Але інша картина спостерігається в районах і селах: там майже не будують нових вулиць та доріг, а технічне обслуговування та підтримка систем вуличного освітлення великих фінансових коштів і відповідних спеціалістів. Тому тут вуличне освітлення в більшості випадків не функціонує, його або демонтують або воно стає непридатним.

На даний час в Україні все більше уваги приділяють питанням вирішення проблем комфортного проживання населення, піднімають питання і з благоустрою, зокрема і вуличного освітлення.

Але варто зазначити, що процес впровадження систем вуличного освітлення є доволі тривалим, а в деяких випадках потребує повного відновлення всієї інфраструктури: мереж і підстанцій живлення, встановлення опор і стовпів

освітлення. Тому у зв'язку з відсутністю необхідних коштів вирішення цього питання у сільських населених пунктах є досить проблематичним.

Отже, розробка систем вуличного освітлення з невеликими капітальними витратами, з можливістю нарощування потужності та мінімальним обслуговуванням є досить актуальною проблемою.

Виконані на кафедрі Електричної інженерії ТНТУ ім. І. Пулюя у 2023-2024 роках попередні дослідження показали, що для забезпечення вище приведених вимог, зокрема норм освітлення вулиць і доріг сільських населених пунктів, можливе при використанні локальних освітлювальних установок на базі СЕС.

Для забезпечення вимог санітарних норм і правило було виконано розрахунок потужності світлодіодного світильника: за головними параметрами такий світильник бути подібний до стандартного, які застосовуються до опор висотою 6-8 м і ламп типу ДРЛ. Потужність таких ламп в стандартних світильниках коливається від 125 до 1000 Вт, але в якості аналога за потужністю найбільш підходять це лампи на 125 Вт і 250 Вт зі світловим потоком 5900 лм і 13000 лм. Діаметр світлової плями (приблизний) з опори висотою 6-8 м повинен становити біля 25 м ($S = 1964 \text{ м}^2$) з освітленістю від 17 лк до 30 лк. Розмір світлового потоку лампи можна визначити за наступною формулою:

$$\Phi_{\text{люмен}} = \Phi_{\text{люкс}} \cdot S, \quad (2.1)$$

де $\Phi_{\text{люкс}}$ — значення освітленості;

S — величина площі світлової плями.

Отже, мінімальна освітленість яку дає лампа типу ДРЛ-125 в якості ліхтаря вуличного освітлення, буде становити:

$$\Phi_{\text{люкс}} = 5900 / 1964 = 3,004 \text{ лк.}$$

Використовуючи проведені вище розрахунки, можна констатувати, що найекономічнішим джерелом світла для вуличного освітлення невеликих територіальних громад можуть бути освітлювальні установки зі світловим потоком в межах 2500-3400 лм та споживаною потужністю 30-50 Вт. Такі консольні світлодіодні світильники виробляє вітчизняна промисловість і вони

мають широке застосування, але не підходять для системи освітлення на базі відновлюваних джерел енергії, яку нам потрібно розробити. Встановлення таких світильників вимагає встановлення потужнішого джерела живлення, яке змогло б забезпечити надійне заряджання акумулятора [19].

Для того, щоб побудувати ефективну систему вуличного освітлення для користувачів територіальних громад сільської місцевості, потрібно розробити принципово іншу, з інтелектуальною системою керування режимами роботи та «розумним» світильником з кроковим регулюванням світлового потоку. На рис. 2.7 приведено схему, що пояснює принцип роботи розробленої системи вуличного освітлення, що живиться від сонячної панелі.

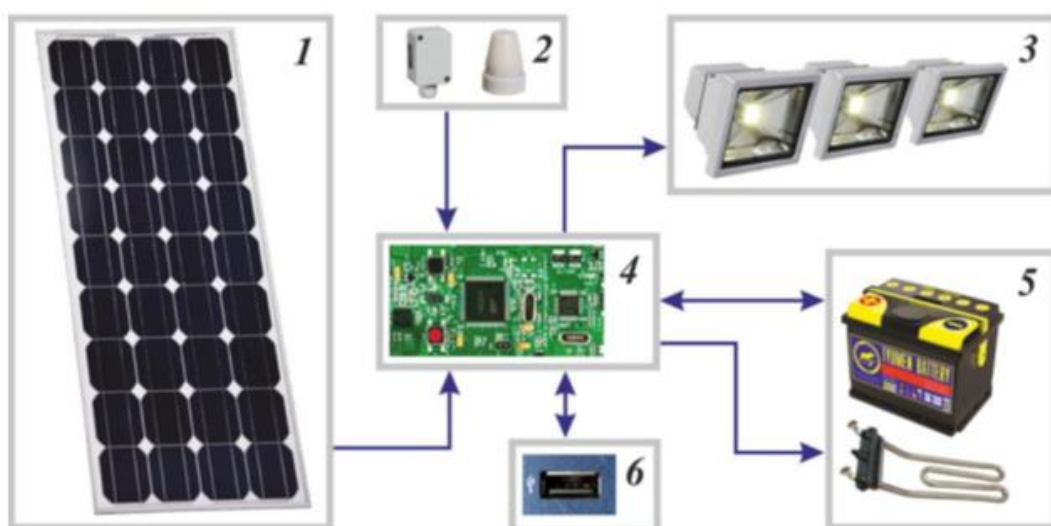


Рисунок 2.7 – Схема системи вуличного освітлення:

1 – сонячна панель; 2 – блок датчиків; 3 – світильники з кроковим регулюванням світлового потоку; 4 – блок керування; 5 – акумулятор; 6 – діагностичний роз'єм

2.3 Дослідження роботи і конструкції розробленої системи

Розглянута на рис. 2.7 схема, стала основою для подальших розробок, і згодом, до неї були внесені зміни та доповнення. Принцип роботи запропонованої системи подібний до інших систем з сонячними панелями. Новинкою є блок керування (4), і «інтелектуальний світильник» з кроковою регуляцією потужності потоку світла (3).

Сонячна панель (1) виробляє постійний електрострум напругою біля 18, поступає в блок керування 4, що складається з контролера заряджання акумулятора. Виконані розрахунки показали, що акумулятор (свинцево-кислотний) ємністю 55 А/год може забезпечити роботу всієї системи без підзаряджання на протязі 30 годин: якщо брати до уваги роботу в темний час доби, то літом період роботи становить 3 доби, зимою – 1 добу, а восени та весною - біля 2 діб. Так як акумулятори вибраного типу погано працюють при низьких температурах, то в запропонованій системі передбачається його підігрівання, яке при зниженні температури нижче 20 °С, вмикається автоматично в холодну пору року при умові повністю зарядженого акумулятора. Отже, вироблена сонячною панеллю електрична енергія спрямовується для підтримки оптимальної температури при роботі акумулятора, що дозволяє підвищити економічність та довговічність розробленої системи.

Пізніше, в ході експериментальних досліджень, для захисту акумулятора від впливу низьких температур, вирішено було розмістити його на деякому заглибленні в ґрунті поруч із опорою, внаслідок чого потреба у підігріві відпала. Нормативна глибина промерзання ґрунту в Тернопільській області згідно санітарних норм і правил складає біля 0,75 м і більше метрів в залежності від типу ґрунту при температурі нижче 0 °С. Отже допустима для роботи температура за умови додаткового утеплення контейнера може перебувати на глибині не менше 0,5 м [26].

При допомозі блока (2), в склад якого входять датчики температури та освітленості, блок керування (4) отримує інформацію про температуру навколишнього середовища та освітленості. З допомогою датчика температури система надзвичайно точно визначає пору року без прив'язки за часом і керує відповідно режимом роботи світильника. В залежності від пори року, інтенсивності сонячної радіації та рівня зарядки акумуляторної батареї, світильник має три режими роботи:

- режим максимальної потужності;
- режим середньої потужності;

- економічний режим.

Зокрема, при роботі світильника на протязі тривалого періоду в економічному режимі, система здійснює оцінку рівня заряду акумуляторної батареї та перехід в режим роботи за таймером. Цей режим передбачає ввімкнення світильника на час T_1 в роботу в економічному режимі після заходу Сонця, а потім вимкнення і вмикання за час T_2 до сходу Сонця. В залежності від рівня зарядки акумулятора параметри T_1 і T_2 можуть зменшуватися або збільшуватися.

Датчик освітленості (блок 2) служить для ввімкнення світильника при настанні темної доби, і вимкнення при появі перших променів Сонця. Система має діагностичний роз'єм (6), що дозволяє за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення контролювати всі параметри системи, програмувати її роботу, змінювати режими роботи, визначати рівень забруднення сонячної панелі і ін. Підключення комп'ютера до системи вуличного освітлення здійснюється за допомогою послідовного інтерфейсу за стандартом USB 2.0.

2.4 Обґрунтування орієнтації сонячних панелей

У системах освітлення на базі відновлюваних джерел енергії джерело електроенергії зазвичай розміщують на одній опорі разом зі світильником. У цьому випадку особливу увагу звертають на конструкцію кріплення сонячної панелі, оскільки від її орієнтації залежить генерована потужність та кількість виробленої енергії. Для орієнтації сонячної панелі застосовують трекер - пристрій відслідковування за Сонцем, який постійно орієнтує площину сонячної панелі перпендикулярно до променів Сонця на протязі світлового дня (рис. 2.8). Трекер разом з контролером МРРТ дозволяє максимально перетворити отриману сонячну енергію на електричну. Недоліком цього способу є доволі складна та дороговартісна конструкція, а сам трекер є складним пристроєм, що вимагає постійного обслуговування і при несприятливих погодних умовах (сніг, дощ, зледеніння тощо) надійність його роботи може суттєво падати.

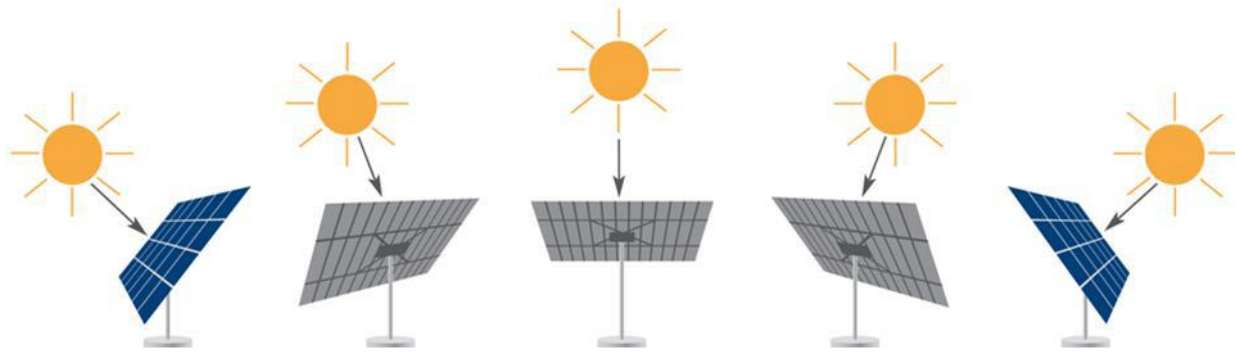


Рисунок 2.8 – Керування положенням сонячної панелі за допомогою трекера

Аналіз використання систем для стеження за положенням Сонця показав, що ці системи доцільно використовувати на СЕС потужністю від 3-5 кВт і вище. Тому застосування трекерів з системами вуличного освітлення, де потужність сонячної батареї може бути в межах 50-200 Вт, не сприятиме підвищенню як надійності всієї системи, так і економічності та ефективності.

Сонячні панелі стараються монтувати під певним кутом до Сонця у напрямі за азимутом на південь або південний схід (рис. 2.9).

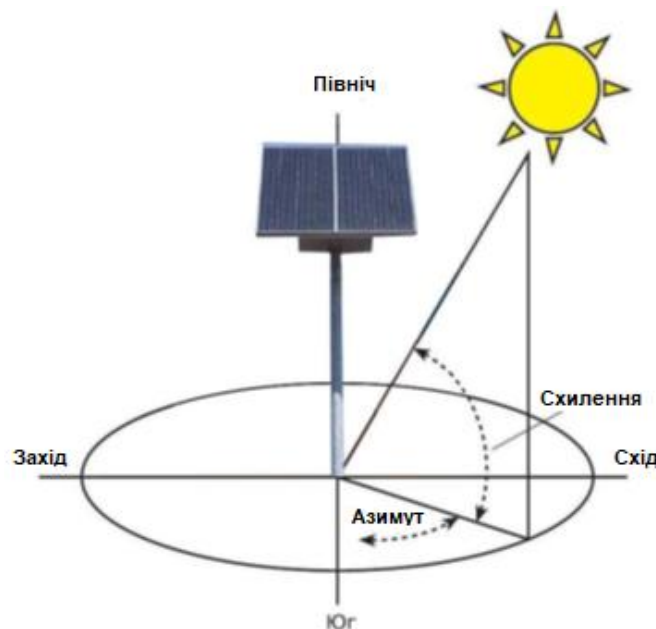


Рисунок 2.9 – Орієнтація сонячної батареї у просторі

Сонячне світло, проходячи шлях від Сонця до Землі, досягає атмосфери, де одна частина світу заломлюється і поглинається, а частина, що залишилася і досягла Землі, є прямою та найбільш інтенсивною радіацією. Відомо, що сонячні панелі виробляють електрику за відсутності прямого сонячного випромінювання, при хмарній погоді, коли сонячне світло слабе та розсіяне, фотоелектрична система буде виробляти електрику.

У табл. 2.3 приведено значення залежності різних умов генерації енергії сонячної панелі від її номінальної потужності.

Таблиця 2.3 – Значення потужності сонячної панелі

Умова	% від максимального випромінювання
Яскраве Сонце	100%
Легка хмарність	60-80%
Похмура погода	20-30%
Віконне скло, один шар	91%
Штучне світло в приміщенні	0,2-1,5%

На рис. 2.4 зображено оптимальні кути нахилу сонячних панелей для літа та зими, а також середнє, розраховане на весь рік значення нахилу $53,55^\circ$ для географічних координат Тернопільського району.



Рисунок 2.4 – Кут нахилу в залежності від пори року

Аналіз відкритих джерел про умови визначення найбільш оптимального кута нахилу з точки зору вироблення електроенергії протягом року дозволив

отримати інші значення, що відрізняються на $3,5^\circ$. Вироблення електроенергії за місяцями протягом року в залежності від кута нахилу подано в табл. 2.4.

Кут нахилу сонячної батареї є важливим параметром, від якого може залежати ефективність всієї системи. Але з табл. 2.4 видно, що невеликі зміни кута нахилу в межах $5-10^\circ$ фактично не впливають серйозно на продуктивність системи.

Таблиця 2.4 – Сонячна радіація в Тернопільській області (кВт·год/м²)

Тернопільська обл., широта $49,33^\circ$	Січ.	Лют.	Берез.	Квіт.	Трав.	Черв.	Лип.	Сер.	Верес.	Жов.	Лист.	Груд.	Рік
Вертикальна панель	77,7	99,7	133	116	96,5	90,3	91,3	99,5	97,1	112	86,8	78,5	1178
Горизонтальна панель	30,2	49,6	94,3	127	152,9	156	145	131	91	64,4	33,6	23,3	1098
Нахил панелі $50,0^\circ$	70,6	95,9	142	148	147,4	143	138	141	120	118	81,6	69,8	1415

2.5 Висновки до розділу 2

В цьому розділі кваліфікаційної роботи було виконано дослідження фотоелектричних перетворювачів і принципу роботи сонячних батарей, проведено розрахунок системи освітлення, результати якого показали, що розробка систем вуличного освітлення з невеликими капітальними витратами, з можливістю нарощування потужності та мінімальним обслуговуванням є досить актуальною проблемою. Також було здійснено дослідження роботи і конструкції розробленої системи з блоком керування та інтелектуальним світильником з кроковим регулюванням потужності потоку світла. Виконано обґрунтування орієнтації сонячних панелей, яке показало, що кут нахилу сонячної панелі є важливим параметром, від якого може залежати ефективність всієї системи.

3 ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Передумови для розробки проєкту міні-СЕС

Проведені на кафедрі електричної інженерії у 2023-2024 рр. теоретичні і експериментальні дослідження дозволили отримати результати, що демонструють можливості індивідуальної освітлювальної установки з живленням від монокристалічної сонячної панелі потужністю 100 Вт.

Винятковість отриманих результатів полягає в тому, що при використанні інтелектуального світильника з триступеневим регулюванням потоку світла, розміщена одна на стовпі міні-СЕС потужністю від 100 до 400 Вт може живити від трьох до десяти світильників по лінії електропередачі постійної напруги 12-24 В. При підвищенні потужності міні-СЕС до 1 кВт і вище та підвищенні напруги лінії електропередачі до 48 В кількість світильників може бути більше 20. В результаті до розгляду було прийнято 2 варіанти систем вуличного освітлення, які живляться від міні-СЕС та передбачається зниження собівартості такої системи освітлення приблизно у 2-3 рази [27].

3.2 Система вуличного освітлення з живленням від міні-СЕС

Найпростіший варіант системи вуличного освітлення, яка живиться від розміщеної на опорі міні-СЕС, складається з інтелектуальних світильників на трьох стовпах. Один із інтелектуальних світильників встановлено на середній опорі разом із міні-СЕС, що має потужність 100 Вт. В попередньому розділі було зазначено, що сонячна панель потужністю 100 Вт може живити три інтелектуальні світильники загальною потужністю від 30 Вт до 90 Вт. Варто зазначити, що світлодіодні світильники значно економічніші у порівнянні зі звичайними лампи розжарювання або лампами типу ДРЛ.

У розробленому проєкті системи освітлення з метою зменшення вартості конструкції було використано стандартний світлодіодний прожектор, який модернізовано під крокове регулювання потоку світла шляхом встановлення двох (двоступеневий) або трьох (триступеневий) світлодіодів потужністю 10 В.

В табл. 3.1 приведено співвідношення потужності світильника до світлового потоку.

Таблиця 3.1 – Значення потужності різних типів світильників

Лампа розжарювання, Вт	Люмінісцентна лампа, Вт	Світлодіодна лампа, Вт	Світловий потік, Лм
60	15-16	8-10	700
75	18-20	10-12	900
100	25-30	12-15	1200
150	40-50	18-20	1800
200	60-80	25-30	2500

На рис. 3.1 приведено систему вуличного освітлення з 3-х світильників з живленням від міні-СЕС потужністю 0,1 кВт, в якій постійна напруга 12 В передається від сонячної електростанції до світильників через повітряну лінію електропередачі.

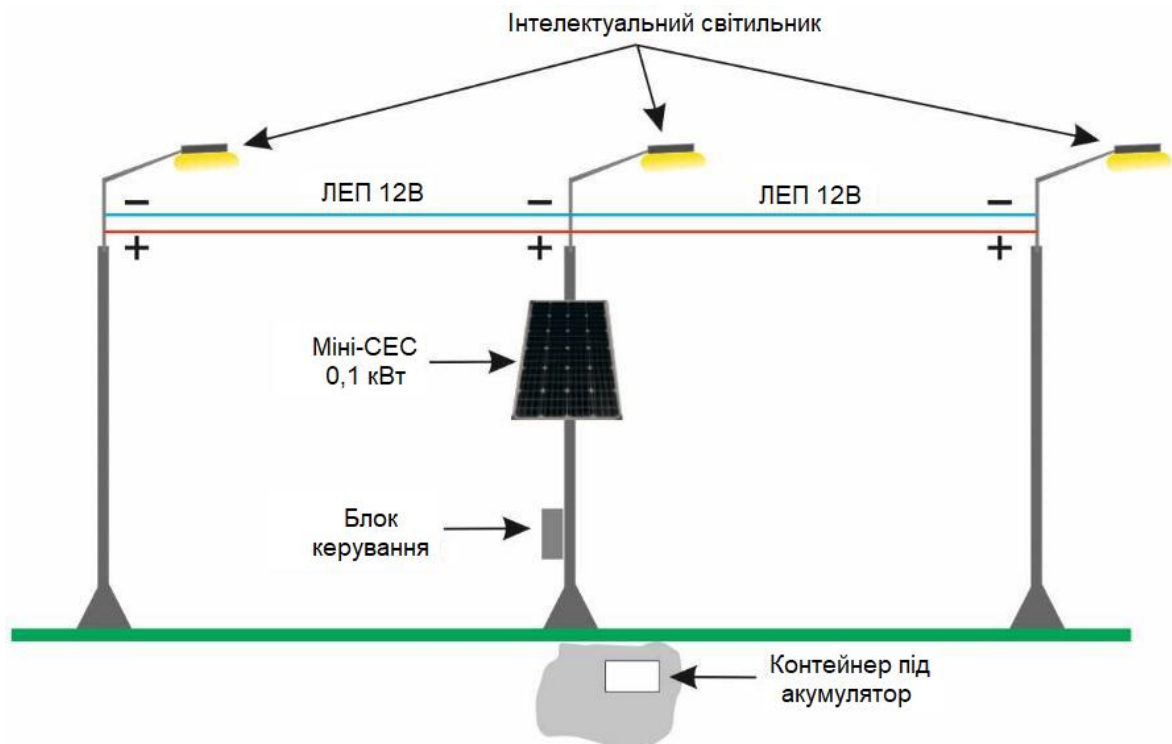


Рисунок 3.1 – Проєкт системи вуличного освітлення

Приведений на рис. 3.1 проєкт система вуличного освітлення можна використати для освітлення невеликих площ, маленьких ділянок, пішохідних зон.

Максимальна відстань між стовпами зі встановленими на них інтелектуальними світильниками становить 50 м і у випадку перевищення цієї відстані підвищити напругу міні-СЕС до 24 В або збільшити перетин дроту лінії електро-передачі. Попередньо проведені розрахунки показали, що економічно не вигідно розробляти міні-СЕС потужністю 100 Вт з напругою 12 В або 24 В для впровадження системи вуличного освітлення з числом світильників, що кратно трьом, оскільки для системи освітлення з шести світильників потрібно буде дві міні-СЕС, для системи з дев'яти світильників – 3 міні-СЕС, і т.д. Для впровадження системи вуличного освітлення з великої кількості світильників, число яких кратно 5, 7, 9 і т.д., виконано розробку потужніших міні-СЕС, потужність яких знаходиться в межах від 0,3 кВт до 1 кВт.

При розробці більш потужних міні-СЕС для систем вуличного освітлення необхідно було вирішити задачу, яка пов'язана з розташування великого числа сонячних панелей на одному стовпі (до 10 шт.). Цю задачу було вирішено через розробку нової і компактної конструкції міні-СЕС, в якій застосовано гетеро-структурні сонячні модулі та модулі з полікристалічного кремнію, що можуть ефективно функціонувати при розсіяному світлі. Конструкції міні-СЕС потужністю 0,3 кВт, 0,5 кВт та 1 кВт показано на рис. 3.2

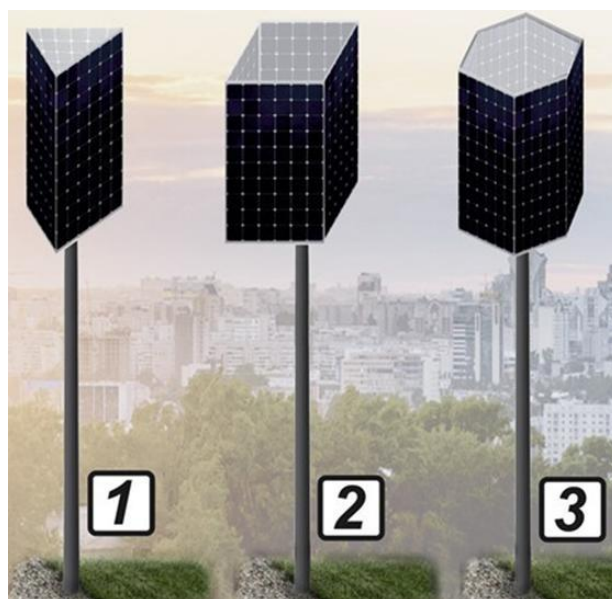


Рисунок 3.2 – Міні-СЕС для систем вуличного освітлення:
1 – 0,3 кВт; 2-0,5 кВт; 3 – 1 кВт

Система вуличного освітлення, що складається з п'яти інтелектуальних світильників на одну міні-СЕС потужністю 0,3 кВт, приведено на рис. 3.3. Постійна напруга 24 В передається від міні-СЕС до світильників кабельною лінією електропередачі.

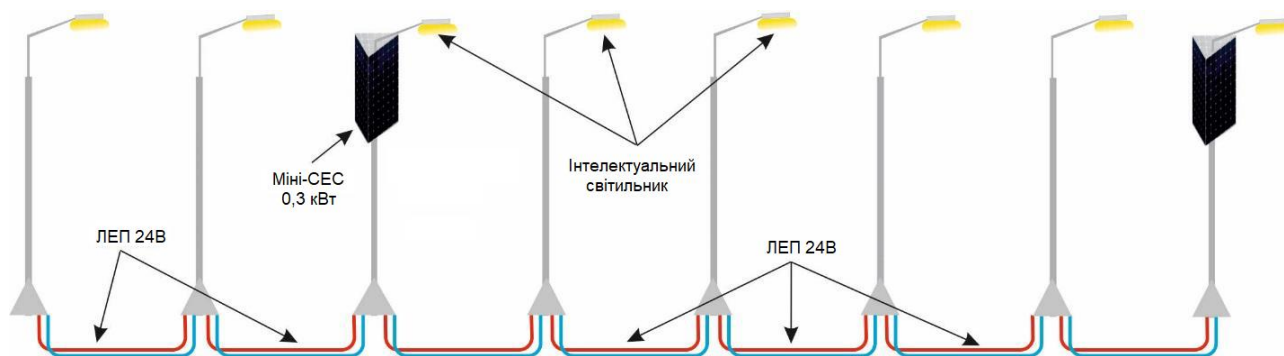


Рисунок 3.3 – Система вуличного освітлення потужністю 0,3 кВт

3.3 Дослідження характеристик фотоелектричних систем

Використання сонячних елементів перетинається із використанням інших джерел електричної енергії, але на противагу їм сонячні панелі мають пряму залежність від кількості сонячного проміння, що попадає на їх поверхню. Відомо, що під час похмурної погоди хмари можуть значно зменшувати початкову потужність сонячної панелі (до 50%). У випадку невеликого виробничого браку сонячних елементів знижується коефіцієнт корисної дії панелей з однієї партії, відповідно для забезпечення необхідної потужності потрібно сортувати елементи за вихідним струмом. Наприклад, якщо у водопровідну трубу з великим діаметром вставити трубу з меншим діаметром, то потік води зменшиться. Аналогічна ситуація буде відбуватися в колі сонячних елементів при неоднорідності їх параметрів.

Оскільки кремнієвий сонячний елемент є нелінійним, то його не можна описати за допомогою закону Ома, але для пояснення його характеристик використовують прості залежності - вольтамперні характеристики (рис. 3.4).

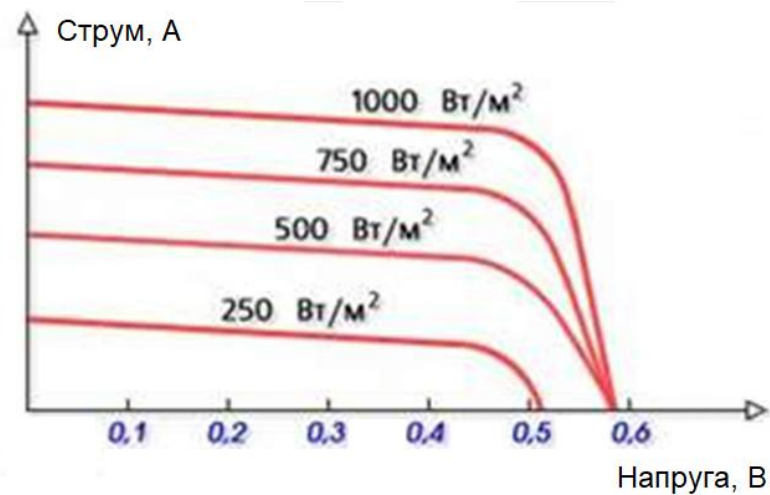


Рисунок 3.4 – Вольт-амперна характеристика сонячного елемента

Генерована одним елементом величина напруги холостого ходу може повільно міняти значення при переході від одного до іншого елемента навіть однієї партії одного виробника (рівна біля 0,6 В). Ця напруга не буде залежати від розміру елемента, але струм буде залежати від інтенсивності світлового потоку та розміру елемента, тобто площі його поверхні. Наприклад, елемент 100 x100 мм у 100 разів більший за елемент 10 x10 мм і, відповідно він при тій самій освітленості генерує у 100 раз більший струм [28].

Отже, якщо поступово здійснювати навантаження сонячного елемента, то отримаємо стандартний графік залежності струму та потужності від напруги, який приведено на рис. 3.5.

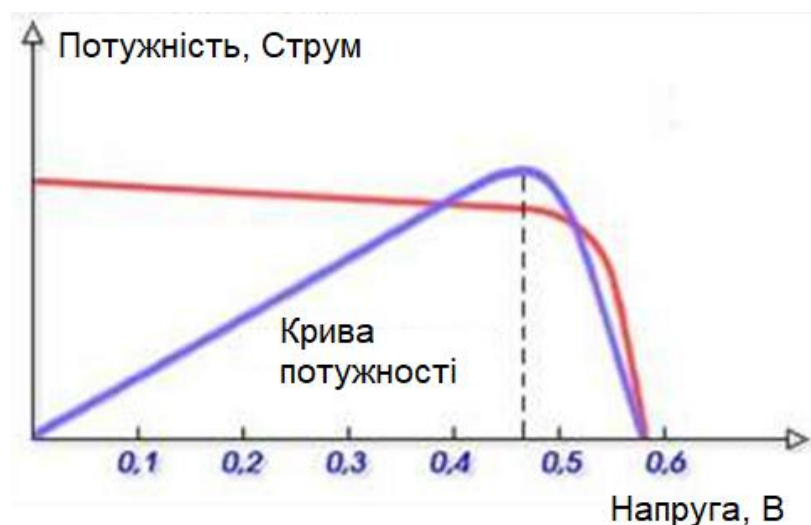


Рисунок 3.5 – Графіки залежності потужності та струму від напруги кремнієвого елемента

Важливою характеристикою роботи кремнієвого елемента є його температура. Наприклад, якщо один елемент нагрівається на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище норми ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$), то він втрачає по напрузі біля $0,002\text{ В}$ - $0,4\%/^{\circ}\text{C}$. На рис 3.6 приведено криву вольт-амперну характеристику для $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

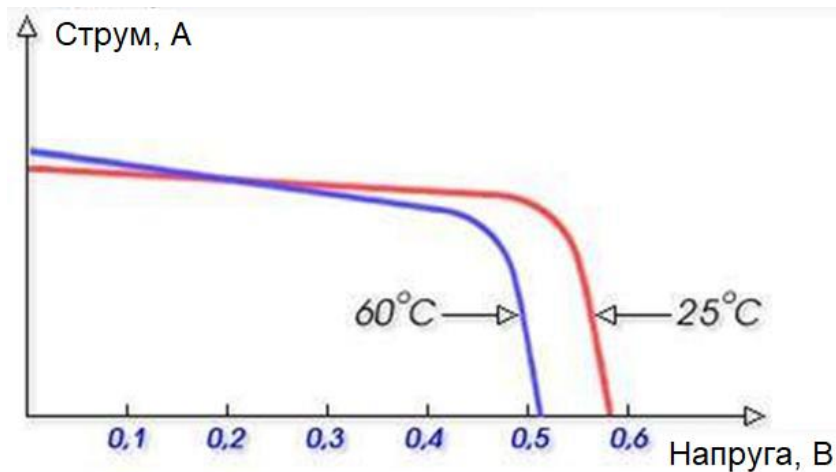


Рисунок 3.6 – Вольт-амперна характеристика при різних температурах

При інтенсивній сонячній погоді кремнієві елементи можуть досягати температури $60\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$ і втрачати при цьому $0,07\text{--}0,09$ кожен, що є причиною падіння напруги коефіцієнта корисної дії кремнієвого елемента.

Електричні характеристики кремнієвого елемента подаються для окремого елемента у вигляді вольтамперної характеристики для нормальних випадків (StandartTestConditions), тобто, при сонячній радіації 1000 Вт/м^2 , температурі $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ та спектрі сонячного випромінювання на широті 50° [28].

Напругу холостого ходу ($U_{\text{хх}}$) відображає точка перетину кривої з віссю напруги ϵ , а струмом короткого замикання ($I_{\text{кз}}$) — точка перетину з віссю струмів (рис. 3.7).

Найбільший показник потужності можна визначити за допомогою стандартів Standart Test Conditions. Напругу у випадку найбільшій потужності називають максимальною (робоча напруга $U_{\text{р}}$), а струм в цій точці - максимальним (робочий струм $I_{\text{р}}$).

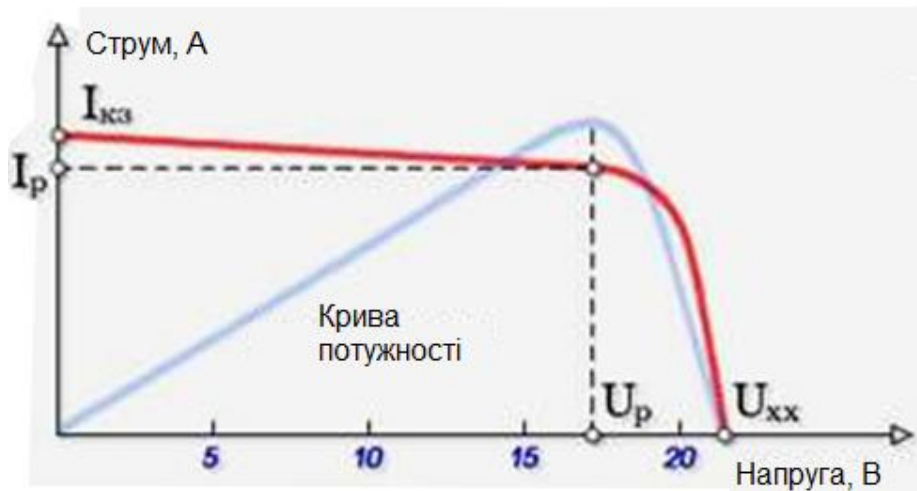


Рисунок 3.7 – Точки максимальної потужності

Наприклад, для модуля, що має 36 елементів, середнє значення для робочої напруги буде мінятися від 16 В до 17 В при температурі 25 °С. Також варто відмітити, що напруга холостого ходу модуля майже не залежить від інтенсивності освітленості, а струм короткого замикання робочий струм прямо пропорційно залежать від неї. Отже, бачимо, що в реальних умовах роботи модулі можуть досягати температури 60-70 °С, а відповідає значенню зсуву точки робочої напруги (наприклад, модуль з робочою напругою 17 В - від 17 В до 13,7-14,4 В, тобто 0,38-0,4В на елемент).

З усього вище сказаного, можна визначити методику розрахунку кількості сонячних панелей та інших елементів міні-СЕС. Під розрахунком будемо вважати знаходження значення номінальної потужності модулів, їх числа та схеми підключення; вибір типу, умов експлуатації та ємності акумуляторних батарей, потужності контролера заряду та визначення параметрів з'єднувальних кабелів [29].

3.4 Розрахунок числа та потужності сонячних панелей міні-СЕС

Проведення розрахунку потужності та числа сонячних панелей міні-СЕС є важливим етапом для формування основних робочих параметрів і характеристик розроблюваного проєкту системи вуличного освітлення, а також для забезпечення її надійної роботи в різних умовах.

При визначенні обсягу енергії, що генерується Сонцем у конкретних географічних та природно-кліматичних умовах, беруть до уваги наступні фактори: середньорічне сонячне випромінювання та його середньомісячне значення при несприятливих умовах. Дані середньорічного сонячного випромінювання та його середньомісячного значення при несприятливих умовах (грудень-січень) приведено в підпункті 2.1 цього розділу кваліфікаційної роботи.

При розгляді 1-го варіанту розрахунок системи освітлення виконують з використанням середньорічного коефіцієнта і певні місяці буде спостерігатися надлишок енергії, а в деякі - недостача. Другий варіант системи освітлення передбачає достатню кількість енергії при відсутності занадто тривалих періодів несприятливої погоди. Отже, можемо виконати розрахунок номінальної потужності модуля.

Беремо із таблиць значення сонячного випромінювання за потрібний період, ділимо його на 1000 та отримаємо число пікогодин (умовний час), на протязі якого Сонце видає максимальну інтенсивність випромінювання 1000 Вт/м^2 . Отже, кількість енергії, яку виробляє один модуль потужністю P_w у період протягом обраного часу, зможе знайти за формулою [30] :

$$W = \frac{kEP_w}{1000}, \quad (3.1)$$

де E - величина сонячного випромінювання за вибраний період;

k – значення коефіцієнта для літнього та зимового періодів (відповідно 0,5 та 0,7).

Коефіцієнт k враховує температуру нагріву сонячних панелей і кут падіння на протязі світлового дня, але має різне значенні літом та зимою внаслідок різного нагрівання панелей у ці періоди. Значення сонячного випромінювання становить $2,36 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу}$ для Тернопільської області у березні.

Загальну потужність сонячних панелей можна розрахувати із добового споживання системи освітлення, в якій основним навантаженням виступають світильники при роботі у темний час доби.

Для системи, яка приведена на рис. 3.1, найбільша потужність світильників становить 90 Вт, а найменша – 30 Вт. Найбільше добове споживання можна знайти за формулою:

$$W_{24} = P \cdot \sum_{св} \cdot T_{\max}. \quad (3.2)$$

Для кожної пори року середнє число годин при максимальній потужності роботи світильників є різним, якщо вибрати найбільше значення добутку потужності на кількість світильників рівному його мінімального потрійного значення, то тривалість часу темної пори доби можна прийняти середню за рік. Для цього розраховують середню довготу дня, що залежна від значення географічної широти місця та нахилу Сонця.

Для м. Тернополя (на 2024 р.) значення довготи дня приведено у табл. 3.2. Реальна середня річна довгота дня для м. становить біля 13 годин.

Таблиця 3.2 – Значення довготи дня щомісячно для м. Тернополя

Місяць	Початок/кінець місяця, год.	Середнє значення день, год.	Середнє значення ніч, год.
Січень	7 / 8	7	17
Лютий	8 / 10	9	15
Березень	10 / 12	11	13
Квітень	13 / 14	13	11
Травень	15 / 16	15	9
Червень	16 / 16	16	8
Липень	16 / 15	15	9
Серпень	15 / 13	14	10
Вересень	13 / 11	12	12
Жовтень	11 / 9	10	14
Листопад	9 / 7	8	16
Грудень	7 / 7	7	17

Отже, за даними табл. 3.2, потрібно забезпечити роботу світильників в середньому на протязі біля 11 годин. В результаті, згідно формули (3.2), добове максимальне споживання буде становити 990 Вт годин.

Щоб розрахувати добову генерацію електричної енергії за допомогою одної сонячної батареї, потрібно знайти добуток її номінальної потужності на час її роботи протягом доби:

$$W_{CB} = P_n \cdot T_{24}. \quad (3.3)$$

Аналіз розглянутих літературних джерел доводить, що вироблену добову потужність за допомогою сонячних батарей можна знайти шляхом добутку її номінальної потужності на п'ять годин її роботи протягом доби при умові тривалості світлового дня біля 9 годин (також і зимою - від світанку до сутінків). Від цього часу потрібно відняти приблизно 4 години, в які через хмарність, опади тощо припадають на низьку інтенсивність сонячного випромінювання та можуть знижувати продуктивність роботи сонячної батареї.

Згідно отриманих розрахунків (табл. 3.2) та проведених спостережень в 2023-2024 рр., для географічних широт Тернопільської області час роботи сонячних батарей збільшується на одну годину більше і становить біля 6 годин.

Отже, для найпростішого варіанту проєкту системи вуличного освітлення, яка живиться від міні-СЕС (три інтелектуальні світильники), пропонується застосувати сонячні панелі потужністю 150-200 Вт. Для здешевлення цього варіанту конструкції системи можна зменшити потужність сонячних панелей до 50 Вт і нижче, але врахувати що, осінню та весною освітлення буде мати мінімальну потужність, а зимою, в залежності від погоди, система може працювати а мінімальній потужності від 1 до 3 годин на добу.

Потужність системи вуличного освітлення, яка живиться від міні-СЕС, буде залежати від з потужності сонячних батарей і накопиченої енергії, тобто від ємності акумуляторних батарей.

3.5 Визначення кількості акумуляторних батарей та їх ємності

Накопичена в акумуляторних батареях енергія протягом світлового часу доби, повинна у темний час доби забезпечити роботу навантаження, тобто інтелектуальних світильників. Енергію акумуляторних батарей можна визначити у вигляді добутку її потужності при номінальній напрузі і вона

інформує про потенційну ємність батарей – протягом якого часу вони можуть мати навантаження при її повній зарядці. Зміна ємності протягом часу живлення навантаження можна визначити за формулою:

$$\Delta C = \frac{P_n}{U_n} \Delta t_{нв} = \frac{P_n}{U_n} (24 - \Delta t_{нв}), \quad (3.4)$$

де P_n – значення номінальної потужності навантаження;

U_n – значення номінальної напруги навантаження;

$\Delta t_{нв}$ – інтервал нічної доби (літом $\Delta t_{нв} = 10$ год, зимою $\Delta t_{нв} = 16$ год).

Глибокий розряд може привести до виходу з ладу акумуляторної батареї, тому їх виробники встановлюють кінцеву напругу розряду, при якій вона відключається від навантаження та починає заряджатися. Щоб акумуляторна батарея мала довгий термін служби, її не рекомендується розряджати більше 70-80% і величину розрядки акумуляторних батарей автономної сонячної електростанції можна визначити за формулою [16]:

$$S_p = \frac{C_n - C_{\min}}{C_n} 100\% = \frac{\Delta C}{C_n} 100\%. \quad (3.5)$$

Якщо виразити з формули (3.5) ємність C_n та врахувати формулу (3.4), то можна отримати формулу для визначення потрібної ємності акумуляторних батарей:

$$C_n = \frac{100}{S_p} \frac{P_n}{U_n} \Delta t_{нв}. \quad (3.6)$$

За допомогою формули (3.6) можна легко визначити потрібну ємність акумуляторних батарей міні-ЕС за умови постійного навантаження. Варто зазначити, що найскладнішим режимом роботи акумуляторних батарей у складі міні-СЕС вважається зимовий період, тому при виконанні розрахунків згідно формули (3.6) приймають $\Delta t_{нв} = 16$ год, а величину розрядки S_p акумуляторної батареї приймають рівною 70%. Чим більше напруга, що видається в наванта-

ження, тим менше може бути ємність, так як струм розряду $I_p = P_n/U_n$ акумуляторної батареї буде нижче.

Для звичайних свинцево-кислотних акумуляторів максимальний струм розряду обмежений значенням, яке в амперах становить від 5 до 25 ємностей акумулятора. Чим менший струм розряду, тим, відповідно, будуть менші втрати потужності, а, отже, вищі ККД системи.

Пояснити застосування напруги 24 В на противагу 12 В при розміщенні інтелектуальних світильників на великій відстані від міні-СЕС можна збільшенням напруги та зниженням струму. Відповідно, для підвищення ефективності системи вуличного освітлення при використанні міні-СЕС вважається застосування вищої напруги постійного струму - що більша потужність електричної станції, то більша перевага високовольтної системи на противагу низьковольтній.

Як уже зазначалося вище, для збільшення ємності акумуляторна батарея необхідної ємності складається з окремих акумуляторних батареї малої ємності їх паралельним з'єднанням, а послідовне з'єднання використовується для збільшення напруги та потужності.

Енергетичну ємність акумуляторних батареї міні-СЕС можна розрахувати за формулою:

$$W = C_n U_n. \quad (3.7)$$

Кількість послідовно з'єднаних одиночних акумуляторних батареї у колі можна визначити наступним чином:

$$n = \frac{U_n}{U_{аб}}, \quad (3.8)$$

де $U_{аб}$ – величина напруги окремої акумуляторної батареї.

Кількість паралельних гілок в акумуляторній батареї можна знайти за формулою:

$$m = \frac{C_n}{C_{аб}}, \quad (3.9)$$

де $C_{аб}$ – величина ємності окремої акумуляторної батареї.

Загальне число окремих акумуляторних батареї в акумуляторній батареї можна розрахувати за формулою:

$$N = n \cdot m. \quad (3.10)$$

Підвищення ефективності системи мініСЕС, що живляться за рахунок збільшення ємності і напруги акумуляторних батареї, це не єдиний спосіб, пов'язаний з накопичувачами енергії. Від типу акумуляторної батареї також можуть залежати багато показників ефективності системи. Для систем альтернативної енергетики та систем резервного живлення зараз випускаються спеціальні акумуляторні батареї.

3.6 Розробка інтелектуального світильника

Основним елементом будь-якої системи штучного (електричного) освітлення є світильник. Сьогодні час найбільшого поширення набули світлодіодні світильники, зважаючи на їх високу економічність і надійність. Однак, для підвищення ефективності та зниження собівартості всієї системи вуличного освітлення, був розроблений унікальний світильник – інтелектуальний, який має ступінчасте регулювання потужності, а також здатний відображати за допомогою індикаційного блоку основні режими роботи мініСЕС.

Силова частина інтелектуального світильника складається з кількох світлодіодів великої потужності. Існує два варіанти виконання силових частин.

Перший варіант - це встановлення в корпус двох світлодіодів з номінальною робочою напругою 12 В по 10 Вт кожен, а другий - установка трьох світлодіодів аналогічної потужності. Схеми першого та другого варіантів приведені на рис. 3.8.

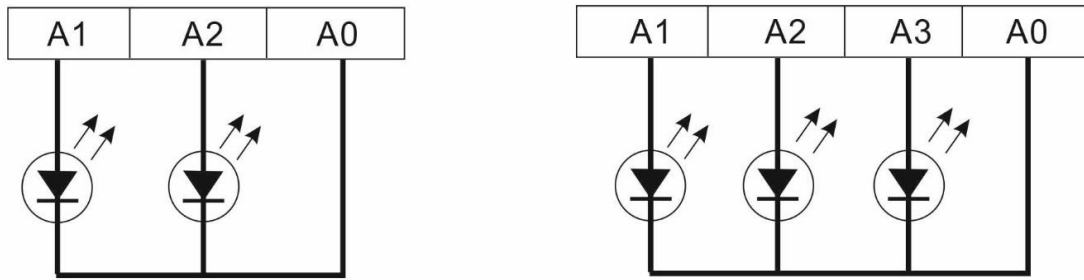


Рисунок 3.8 – Схеми світильників 20 Вт (ліворуч) та 30 Вт (праворуч)

Регулювання потужності світлового потоку здійснюється шляхом подачі напруги з блоку керування на контакти A1, A2 і A1, A2, A3 відповідно. Таким чином регулюється потужність інтелектуального світильника: для потужності 20 Вт у дві ступені - 10+10 Вт, для потужності 30 Вт у три ступені - 10+10+10 Вт.

Інтелектуальний світильник має вбудований блок індикації, який відображає стан режимів роботи міні-СЕС та рівня заряду акумуляторів. Це дозволяє візуально у світлий час доби стежити за станом системи вуличного освітлення. Принципова схема блоку індикації зображена рис. 3.9, а відображення рівня зарядки (за кольором) і режиму роботи міні-СЕС – на рис. 3.10.

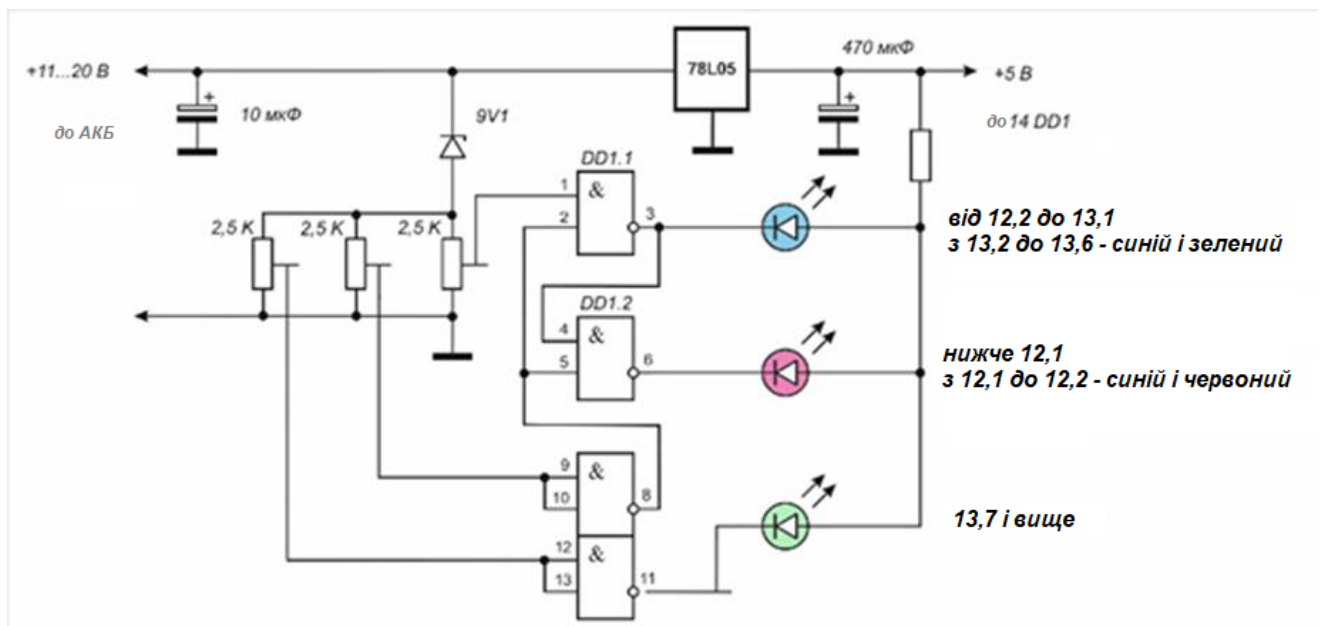


Рисунок 3.9 – Принципова схема блоку індикації

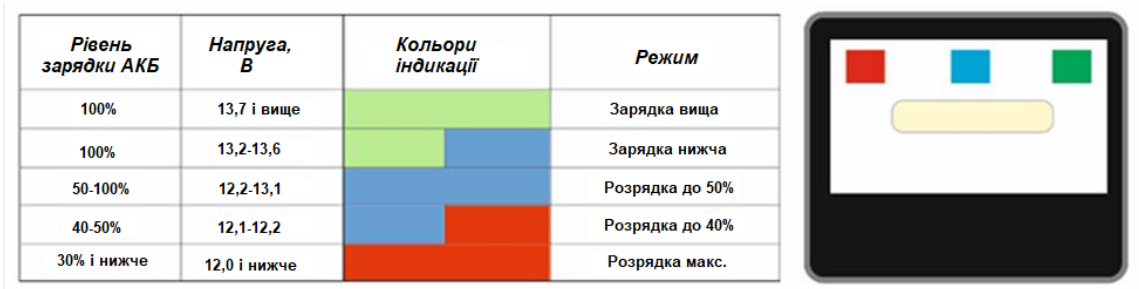


Рисунок 3.10 – Принципова схема блоку індикації

Конструкція інтелектуального світильника з двоступінчастим регулюван-
ням світлового потоку представлена на рис. 3.11.



Рисунок 3.11 – Модель інтелектуального світильника потужністю 20 Вт

Більш досконала схема блоку індикації інтелектуального світильника на
базі прецизійного компаратора LM2901N приведена на рис. 3.12.

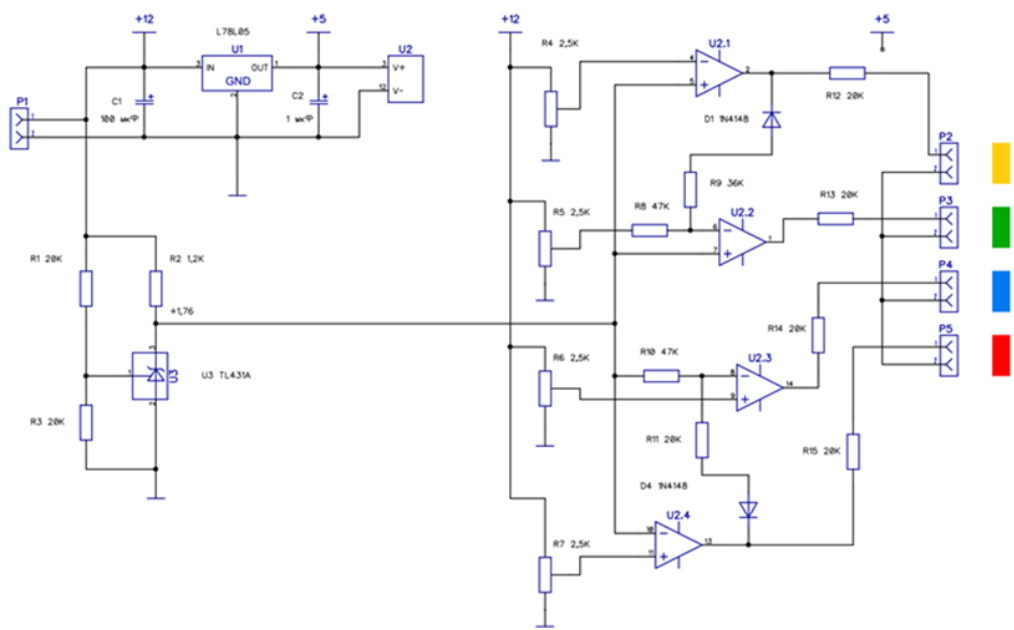


Рисунок 3.12 – Схема чотиризначного блоку індикації

3.7 Висновки до розділу 3

В цьому розділі кваліфікаційної роботи було розглянуто передумови для розробки проєкту міні-СЕС на базі проведених на кафедрі електричної інженерії у 2023-2024 рр. теоретичних і експериментальних досліджень. В результаті до розгляду було прийнято 2 варіанти системи вуличного освітлення, що живляться від міні-СЕС та передбачається зниження собівартості такої системи освітлення приблизно у 2-3 рази.

Виконано дослідження характеристик фотоелектричних систем і визначено методику розрахунку кількості сонячних панелей та інших елементів міні-СЕС.

Проведено розрахунок числа та потужності сонячних панелей міні-СЕС та визначено кількість акумуляторних батарей та їх ємність. Потужність системи вуличного освітлення, яка живиться від міні-СЕС, буде залежати від з потужності сонячних батарей і накопиченої енергії, тобто від ємності акумуляторних батарей.

Виконано розробку інтелектуального світильника, який має ступінчасте регулювання потужності, а також здатний відображати за допомогою індикаційного блоку основні режими роботи міні-СЕС.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз шкідливих і небезпечних факторів, які можуть виникнути при монтажі й експлуатації сонячної установки

Сонячні колектори дуже швидко прогріваються, а головний тепловідвідний колектор здатен нагріватися до дуже високих температур (до 160 °C). Тому при роботі з колектором треба бути дуже уважним, щоб уникнути опіків шкіри [37].

Крім сонячних панелей до складу комплексу входить вітроенергетична установка Е 1,5 (1,5 кВ), яка, в свою чергу, є джерелом двох видів шумів: механічного (удари, коливання окремих деталей та обладнання в цілому) і аеродинамічного (шум газів або повітря). У результаті цього у людини в процесі праці можуть виникнути різні психічні порушення, серцево-судинні, шлунково-кишкові та шкірні.

Дослідження в області шуму показали, що шум є загальним біологічним подразником, впливаючи не тільки на слух, але, в першу чергу, на структуру головного мозку, викликаючи порушення в різних функціональних системах організму [31].

Оскільки монтаж сонячної установки, сонячних панелей зокрема пов'язаний з роботами, які виконуються на висоті, то існує ризик травмування робітників внаслідок падіння з даху або з конструкцій, які допомагають на цю висоту дістатися.

Сонячна установка постійно знаходиться під напругою, тому є імовірність ураження людини електричним струмом як під час монтажу, так і під час експлуатації системи.

4.2 Розрахунок струму при одно- і двохполюсному дотику до струмоводних частин сонячної установки

Проведемо розрахунок величини струму, що пройде крізь тіло людини при однополюсному і двохполюсному дотику до струмоведучих частин вітросонячного комплексу. Розглянемо трифазну мережу з глухозаземленою нейтраллю. При однополюсному дотику можливі два варіанти: людина торкається до нульового провідника і людина торкається до фазного провідника (однофазний дотик) [32]. Розглянемо перший варіант.

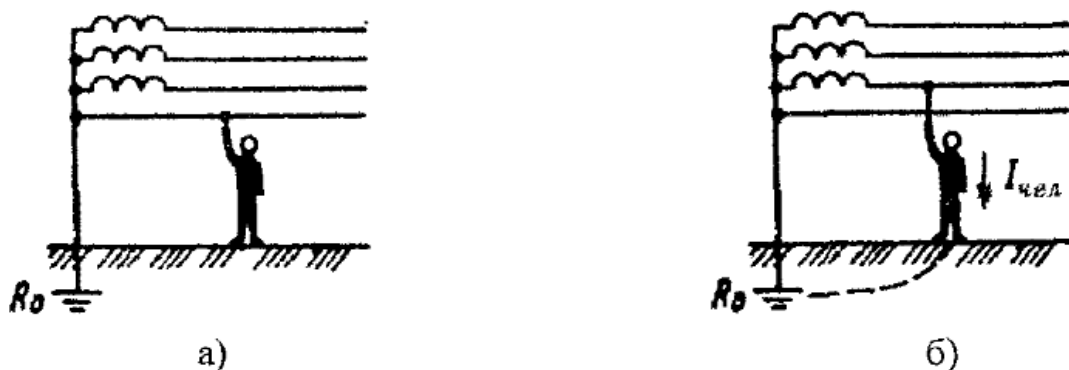


Рисунок 4.1 - Однополюсний дотик до мережі з глухозаземленою нейтраллю

Як видно з рис. 4.1, у даному випадку струм крізь тіло людини не проходить і такий дотик є безпечним для людини. Тепер розглянемо другий варіант (рис. 4.1 б). У цьому випадку струм, що проходить через тіло людини, визначається як [38]:

$$I_{\text{люд}} = \frac{U_{\phi}}{R_0 + R_{\Pi} + R_{\text{в}} + R_{\text{люд}}}, \quad (4.1)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга,

R_0 – опір заземлення нейтралі (приймаємо $R_0 = 4 \text{ Ом}$),

R_{Π} – опір підлоги,

$R_{\text{в}}$ – опір взуття,

$R_{\text{люд}}$ – опір тіла людини (приймаємо $R_{\text{люд}} = 1,5 \text{ кОм}$).

Опір підлоги для сухого асфальтного покриття визначаємо з [40]. Він дорівнює $R_{\Pi} = 2000 \text{ кОм}$. Опір взуття вибираємо для взуття зі шкіряною підошвою і сухої підлоги з [37]. Він дорівнює $R_B = 100 \text{ кОм}$.

Тоді значення струму дорівнює:

$$I_{\text{люд}} = \frac{220}{4 + 2000 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3 + 1,5 \cdot 10^3} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$$

Така величина струму є безпечною для організму людини.

Тепер розглянемо двополюсний дотик. При двополюсному дотику також можливі два варіанти, коли людина торкається до нульового провідника і фазного провідника (рис. 4.2 а), і людина торкається до двох фазних провідників (рис. 4.2 б).

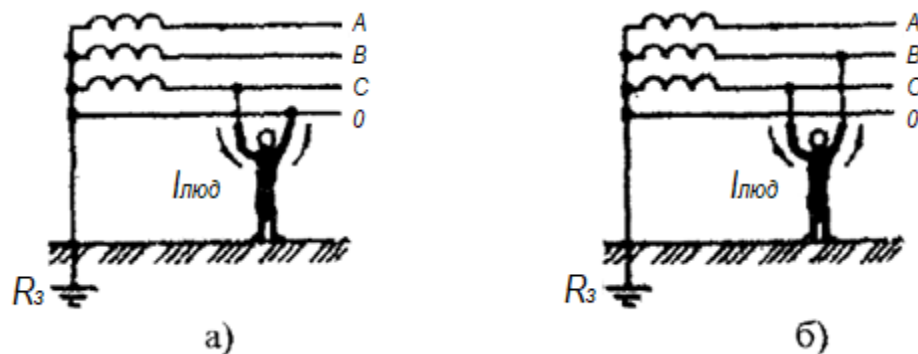


Рисунок 4.2 - Двополюсний дотик до мережі з глухозаземленою нейтраллю

Розглянемо перший варіант. У цьому випадку струм через тіло людини знайдемо за формулою [38]:

$$I_{\text{люд}} = \frac{U_{\phi}}{R_{\text{люд}}}. \quad (4.2)$$

Підставивши чисельні дані, одержимо:

$$I_{\text{люд}} = \frac{220}{1500} = 0,147 \text{ А.}$$

Дане значення струму частотою 50 Гц є смертельним для людини.

Розглянемо другий варіант. У цьому випадку струм, що проходить крізь тіло людини, визначається за формулою:

$$I_{\text{люд}} = \frac{U_{\text{Л}}}{R_{\text{ЛЮД}}}. \quad (4.3)$$

де $U_{\text{Л}}$ – лінійна напруга мережі.

Тоді

$$I_{\text{люд}} = \frac{380}{1500} = 0,253 \text{ А}.$$

Дане значення струму частотою 50 Гц також є смертельним для людини.

4.3 Заходи безпеки життєдіяльності для захисту працівників

Для гарантування безпеки життєдіяльності необхідно керуватися сучасними нормами і правилами, що стосуються монтажу, налагоджування та експлуатації сонячної установки.

Монтаж сонячної установки. Перед монтажем сонячної установки потрібно обстежити стан конструкції та покрівлі даху з точки зору додаткового навантаження на ці конструкції. Сонячні панелі можуть бути змонтовані на плоскій та похилих стелажах як елементи фасаду будівлі або на рамах біля будинків. При монтажі потрібно дотримуватися інструкцій щодо виконання висотних робіт [40]. Кожен монтажник повинен мати довідку про завершення перепідготовки в сфері виконання робіт на висоті. При роботі на висоті більше 4 м вимагається допуск до висотних робіт.

Розташування вітрогенератора на місцевості виконується у відповідності з розою вітрів і рельєфом місцевості заданої карти.

Необхідно враховувати, що відстань між вітроустановками повинна бути більшою, ніж 5-10 діаметрів вітрового колеса.

Правила електробезпеки. Електричні пристрої, що застосовуються в геліосистемі при монтажі та експлуатації, підпадають під норми та правила безпеки щодо ураження електричним струмом для установок напругою до

1000 В. Правила влаштування електроустановок для установок до 1000 В передбачають наступні правила безпеки [33]:

- застосування безпечної напруги (до 36 В);
- ізолювання струмопровідних частин від прямого дотику (основний захист);
- додаткові заходи безпеки, що забезпечують безпечність від ураження струмом на доступних неструмопровідних частинах обладнання, який з'являється у результаті пошкодження ізоляції струмопровідних частин.

У електричних пристроях з напругою, що перевищує 1000 В, охорона від ураження електричним струмом забезпечується одночасним застосуванням заходів безпеки перед безпосереднім дотиком.

До безпечних джерел живлення можна віднести:

- трансформатори безпеки (захисний рансформатор);
- перетворювачі безпеки;
- батареї акумуляторів;
- електронні пристрої.

До основних заходів безпеки відносяться:

- ізоляція струмопровідних частин електричних пристроїв;
- прикриття струмопровідних деталей та частин захисними корпусами, кожухами тощо;
- розміщення струмопровідних деталей та частин у важкодоступних місцях;
- застосування дугових комірок в електричних апаратах;
- під час робіт слід користуватися слюсарно-монтажними інструментами з ізольованими рукоятками;
- місця під'єднання струмопровідних проводів ізолювати трубчастою або плитковою ізоляцією;
- між струмопровідними шинами та металевим корпусом передбачається відповідний ізоляційний проміжок;
- захисні чохли, кожухи або перегородки в приміщенні виконуються з матеріалів, що не дозволяють торкання до голих шин або затисків.

До додаткових заходів електробезпеки належать:

- занулення;
- заземлення;
- захисна мережа;
- запобіжники;
- блокування різних джерел живлення;
- ізоляція корпусу та захисна ізоляція.

Згідно правил пристроїв електроустановок (класифікація приміщень за небезпекою ураження електрикою) СЕС відносяться до особливо небезпечних, так як вони поєднують кілька ознак з підвищеною небезпекою. А саме:

- струмопровідні підлоги (земля);
- жаркі приміщення (температура до 35°);
- можливість одночасного дотику людини до металевих корпусів електрообладнання і до з'єднання з землею металоконструкцій.

Відповідно до цього дотримуються наступних правил розміщення електроустаткування:

- кнопки управління встановлюють на робочих місцях;
- проводка відкрита, кабелі, висота підвісу 2,5 м.

Апаратура управління розміщується в шафах, в спеціальному приміщенні – електрощитовій. Доступ до неї має тільки спеціальний персонал (електрики). Пускозахисна апаратура розташовується в технологічному коридорі в шафах управління ШУМ [34]. Корпус ШУМ заземлюється. Також заземленню підлягають корпуси електродвигунів. Основним показником виробничого травматизму є коефіцієнти частоти травматизму (Кч) і коефіцієнт тяжкості травматизму (Кт). Коефіцієнт частоти відображає кількість нещасних випадків на тисячу працюючих. Він визначається формулою [35]:

$$K_q = 1000 \times N/P,$$

де N – число нещасний випадок, од.;

P – середньорічна чисельність працівників.

Коефіцієнт тяжкості травматизму показує кількість днів непрацездатності, що припадають на один нещасний випадок. Він визначається за формулою [35]:

$$K_T = T/M,$$

де T – втрачено днів, дн.;

M – кількість потерпілих.

Показник втрат – середнє число людино - днів непрацездатності на 1000 працюючих.

Протипожежна охорона. При монтажі і експлуатації вітросонячного комплексу необхідно знати і виконувати норми протипожежної охорони. Вітросонячний комплекс має бути оснащений засобами пожежогасіння, а обслуговуючий персонал повинен:

- правильно поводитися у випадку пожежі;
- вміти гасити електроенергетичні пристрої;
- правильно користуватися засобами пожежогасіння;
- знати заходи, які запобігають виникненню пожеж.

Захист від удару блискавки і вирівнювання потенціалів. При наявності блискавковідводу необхідно приєднати до нього і сонячну установку. Крім того, у конструкції потрібно передбачити вирівнювання потенціалів. Воно несе захисну функцію та запобігає електрохімічним процесам руйнування металічних частин сонячної установки.

Захист від шуму. Захист від шуму повинен забезпечуватися розробкою шумобезпечної техніки, застосуванням засобів і методів колективного захисту, в тому числі будівельно-акустичних, застосуванням засобів індивідуального захисту.

У першу чергу слід використовувати засоби колективного захисту. По відношенню до джерела збудження шуму колективні засоби захисту поділяються на засоби, що знижують шум у джерелі його виникнення, і засоби, що знижують шум на шляху його поширення від джерела до об'єкта, що захищається [36].

Зниження шуму в джерелі здійснюється за рахунок поліпшення конструкції комплексу або зміни технологічного процесу. Засоби, що знижують шум у джерелі його виникнення в залежності від характеру шумоутворення поділяються на засоби, що знижують шум механічного походження, аеродинамічного та гідродинамічного походження, електромагнітного походження.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі вирішена актуальна наукова задача – розроблено проєкт системи вуличного освітлення на базі сонячної міні-електростанції. Також було запропоновано заходи щодо використання альтернативної електричної енергії та виконано технічне обґрунтування розробки сонячної міні-електростанції для системи вуличного освітлення, що дозволяє підвищити ефективність енергозабезпечення для територіальних громад України.

В результаті виконання кваліфікаційної роботи та проведених досліджень були отримані наступні результати.

1. Досліджено загальні принципи побудови фотоелектричних систем та принцип роботи сонячних панелей.
2. Розроблено схему керування та конструкцію економічної системи вуличного освітлення.
3. Проаналізовано кліматичні умови для клімату України та ,зокрема, для міста Тернополя.
4. Розроблено сонячну міні-електростанцію для живлення систем вуличного освітлення.
5. Виконано розрахунок параметрів сонячної міні-електростанції, що дозволяє підвищити її ефективність та підібрати відповідне обладнання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Джерела енергії : підручник / В. І. Шкляр, В. В. Дубровська. – К. : КПІ ім. І. Сікорського : Політехніка, 2018. – 336 с. – ISBN 966-622-870-6.
2. Енергоефективність та відновлювальні джерела енергії / Під заг. ред. А.К. Шидловського. - Київ: Українські енциклопедичні знання, 2007. – 560 с.
3. Касич А. О. Чинники розвитку альтернативної енергетики у сучасних умовах [Електронний ресурс] / А. О. Касич, Я. О. Литвиненко // Економіка та суспільство. – 2017. – Вип. 12. – С. 93-99. – Режим доступу: <http://economyandsociety.in.ua/journal-12/19-stati-12/1291-kasich-a-o-litvinenko-ya-o>
4. Використання сонячної енергії. Під ред. Л.Є. Рибаквої. Ашгабад: Наука, 2015
5. Головка В.М., Коханевич В.П., Шихайлов М.О. Дослідження процесів перетворення вітру в локальних енергосистемах. Альтернативна енергетика і екологія. - Київ, 2011. № 8. - С. 44-49.
6. Сумарне випромінювання // Словник – довідник з екології : навч.-метод. посіб. / уклад. О. Г. Лановенко, О. О. Остапішина. — Херсон : ПП Вишемирський В.С., 2013. — С. 170-171
7. Сонячна енергетика: теорія та практика: монографія/ Й.С. Мисак, О.Т. Возняк, О.С. Дацько, С.П. Шаповал; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2014. – 340 с. : іл. – Бібліогр.: С. 323-337.
8. Сучасні технологічні процеси, обладнання та устаткування фотоелектричного перетворення сонячної енергії/: к.т.н. Будько В.І. – модуль - Київ: Національний технічний університет України («КПІ»), 2015 – 18 с. Режим доступу: http://www.reee.org.ua/download/trainings/%D0%A2%D0%9C_10.pdf
9. Атлас енергетичного потенціалу поновлюваних джерел енергії України розроблено Інститутом електродинаміки НАН України за підтримки Державного комітету України з енергозбереження. – К., 2000.
10. Фотоелектрична географічна інформаційна система.
URL: <https://pvgis.com/uk>

11. Оробчук Б., Панькевич А. Модель автономної сонячної електростанції для малих сільськогосподарських підприємств. VII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». – Тернопіль, ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2018 р.
12. Сонячна енергетика - один з перспективних напрямів розвитку відновлюваної енергетики в Україні. Урядовий портал. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.kmu.gov.ua/control/publish/article?art_id=248970577
13. Оробчук Б., Луцик А. Імітаційна модель автономної сонячної електростанції. Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 24–25 лист. 2021) // М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]: ТНТУ, 2021.
14. Лукутін Б.В. Відновлювальні джерела енергії. Електронний навчальний посібник. [Електронний ресурс].- Режим доступу: URL: <https://solar.kyiv.ua/goto-vi-sistemy>
15. Кривда В.І., Рудницький В.Г., Суворов В.О., Зубак В.В. Підвищення ефективності роботи сонячних панелей при використанні MPPT – контролера // Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2022. № 36 (112). ISSN 2221-3805
16. Оробчук Б., Аріаіфо Ф. Математична модель акумуляторної батареї сонячної водопідйомної установки. Актуальні питання розвитку агропромислового комплексу. ВП НУБІП України «Бережанський агротехнічний інститут». - Бережани, 2016 р.
17. Orobchuk, B., Buniak, O., Babiuk, S., Sysak, I. Design of an intelligent system to control educational laboratory equipment based on a hybrid mini-power plant. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2023, 2(9-122), pp. 59–72
18. Дослідження роботи фотоелектричного модуля [Текст]: Метод. вказівки до виконання лабораторної роботи для студентів спеціальності «Теплоенергетика» / Уклад. В.В. Дубровська, В.І. Шкляр, В.В. Задвернюк – К.: НТУУ «КПІ», 2017
19. Карпчук Г. Л., Будько В. І. (2023). Аналіз технологій фотоелектричного перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію. Відновлювана енергетика. № 2(73). С. 32–38.

20. Сонячна батарея - будова і принцип роботи! [Електронний ресурс]. - Режим доступу: URL: <https://prel.prom.ua/a315870-sonyachna-batareya-budova.html>
21. Все про сонячні панелі: типи, характеристики, особливості застосування. - Режим доступу: URL: <https://130.com.ua/uk/vse-pro-sonyachny-paneli>
22. Оробчук Б., Кіт Н. Дослідження режимів роботи моделі сонячної електростанції в пакеті MATLAB. Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7-8 грудня 2022) // М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]: ТНТУ, 2022.
23. Підключення сонячних батарей: схеми та способи. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: URL: <https://journal.vencon.ua/ua/yake-byvaye-zyednannya-sonyachnyh-paneley>
24. Розуміння важливої ролі роз'ємів MC4 у сонячних панелях. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: URL: <https://joca-cable.com/uk/blog/solar-panel-mc4>
25. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Технічні норми. – Чинні з 28.02.2019. – К.: 2018. – 133с.
26. Будівельна кліматологія. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 // Київ. - Мінрегіонбуд України, 2011
27. Vadym Koval, Bohdan Oorbchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing // International conference advanced applied energy and information technologies 2021 // TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk “» LLC
28. Горянїн, В. М. Вимірювач ВАХ сонячних елементів : дипломна робота бакалавра : 6.050801 Мікро- та наноелектроніка / Горянїн Володимир Миколайович. – Київ, 2019. – 49 с.
29. Коваль В.П. Оробчук Б.Я., Осадца Я.М. Костик Л.М. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів // Вісник Хмельницького національного університету – 2022. - №5. – С.168–173

30. Скільки потрібно батарей потрібно для моєї сонячної системи. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: URL: <https://solarverse.com.ua/news/skilki-potribno-batarey-dlya-moei-sonyachnoi-sistemi>
31. Ткачук К.Н., Зацарний В.В., Третькова Л.Д., Мітюк Л.О. Охорона праці і промислова безпека: навчальний посібник. Київ: Лібра, 2010. - 425 с.
32. Бондаренко О.В., Іоргачов Д.В.. Дослідження опорів заземлювальних пристроїв у неоднорідній землі // Методичне керівництво до лабораторної та навчально-дослідницької роботи студентів. – Одеса, 2003
33. ПУЕ - Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання)/ Наказ від 21.07.2017 № 476 Про затвердження Правил улаштування електроустановок
34. Правила експлуатації електрозахисних засобів. Вид. офіц. Київ: Міністерство енергетики, 2002. 46 с.
35. Кухаровський П. П. Електробезпека на виробництві та в побуті. Хмельницький: [б.в.], 2007. 240 с.
36. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «Безпека в надзвичайних ситуаціях» / В.С. Стручок –Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., –156 с.
Отримано з <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39196>
37. Оробчук Б.Я., Буняк О.А., Бабюк С.М., Сисак І.М., Вакуленко О.О. Методичні вказівки щодо виконання та оформлення дипломної роботи за ступенем «магістр». Тернопіль, ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017 р