

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: ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ПІДКЛЮЧЕННЯ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У БАТАРЕЮ

Виконав студент VI курсу, групи ЕММ-61
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Слободян С. В.
(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Вакуленко О.О.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Тарасенко М.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2021

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 71 сторінки, аркушів презентації, 29 ілюстрацій, 2 таблиці та 14 використаних першоджерел.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення променевої енергії у фотоелектричних елементах при різних комбінації послідовно-паралельного підключення.

Предмет дослідження – є фотоелектричні елементи та їх схеми підключення у батарею.

Метою кваліфікаційної роботи є: збільшення продуктивності ФЕП при зниженій освітленості шляхом зміни схеми підключення фотоелектричних елементів при зміні рівня випромінювання.

У роботі: розглянуто аналіз існуючих фотоелектричних перетворювачів на основі кристалічних, тонкоплівкових напівпровідникових, органічних матеріалів, їх принцип побудови та характеристики і моделі, що застосовуються для імітування фотоелектричних батарей; проведено дослідження із запропонованим варіантом підключення фотоелектричних перетворювачів; розроблено схеми підключення фотоелектричних перетворювачів для підвищення продуктивності як фотоелектричних батарей індивідуального користування, так і сонячних електростанцій в цілому при низьких рівнях освітленості.

Ключові слова: СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ, БАТАРЕЯ, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Розвиток нетрадиційної та поновлювальної енергетики в світі	9
1.2 Фотоелектричні елементи, модулі і батареї	11
1.3 Переваги фотоелектричних систем електроживлення	14
1.4 Нові фотоелементи на основі кристалічних плівок CuInSe ₂ (CIS).....	15
1.5 Нові фотоелементи на основі органічних матеріалів.....	16
1.6 Висновки до розділу	17
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	18
2.1 Опис фотоелектричної установки з підвищеною продуктивністю при зниженій освітленості.....	18
2.2 Аналіз математичних моделей для розрахунків потужності фотоелектричних батарей.....	21
2.3 Аналіз роботи фотоелектричних батарей в залежності від природних факторів	24
2.3.1 Сонячне випромінювання	24
2.3.2 Температура повітря і швидкість вітру	25
2.3.3 Вологість і тиск повітря.....	27
2.4 Висновки до розділу	28
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	29
3.1 Математична модель сонячного елемента при протіканні постійного струму	29
3.2 Визначення профілю освітленості.....	31
3.3 Визначення необхідної ємності і вибір акумуляторної батареї.....	40

3.4	Визначення мінімального часу зарядки акумуляторної батареї.....	43
3.5	Визначення профілю навантаження.....	44
3.6	Розрахунок ефективного значення щільності потоку сонячного випромінювання	46
3.7	Визначення факторів, які впливають на вихідну потужність фотоелектричних елементів.....	49
3.8	Визначення числа послідовно і паралельно з'єднаних елементів фотоелектричної батареї.....	54
3.9	Аналіз отриманих результатів	57
3.10	Висновки до розділу	61
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	63
4.1	Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання.....	63
4.2	Причини електротравм, напруга кроку.....	64
4.3	Запобігання виникненню та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного походження на об'єктах електроенергетики	66
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	69
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	70

ВСТУП

Актуальність теми. В даний час пошук і активне використання нових альтернативних джерел енергії в багатьох розвинених країнах світу прийняті в якості життєво важливих, стратегічно необхідних ресурсів, що забезпечують перспективний розвиток економік цих країн. Прогнозується, що частка альтернативної енергетики (сонячної, вітряної, приливної, геліоенергетики і т.п.) в світовому енергоспоживанні буде щорічно зростати і до 2030 р складе 30%, до 2050 р – 50%. Однак, незважаючи на багатообіцяючі результати, альтернативні джерела енергії поки що не знайшли на рівень оптимального відповідності очікуванням масового споживача.

Наведемо лише кілька цифр, що характеризують інтенсивність інноваційних процесів в світі щодо альтернативних джерел енергії: в США на подібні розробки в 2005 році виділено з федерального бюджету \$ 275 млн., В Японії – щорічно 30 млрд. Ієн (близько \$ 273 млн.), А європейський бюджет досліджень ВДЕ перевищує 2 млрд. євро (період 2002-2006 роки).

Таким чином, можна констатувати, що в даний час пошук і активне використання нових альтернативних джерел енергії в багатьох розвинених країнах світу прийняті в якості життєво важливих, стратегічно необхідних ресурсів, що забезпечують перспективний розвиток економік цих країн.

Основна проблема фотоелектричних перетворювачів в тому, що вони працюють вдень і з меншою ефективністю працюють в ранкових і вечірніх сутінках. Крім того, вироблена ними електроенергія може різко і несподівано коливатися через зміни погоди.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є: збільшення продуктивності ФЕП при зниженій освітленості шляхом зміни схеми підключення фотоелектричних елементів при зміні рівня випромінювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих фотоелектричних перетворювачів на основі кристалічних, тонкоплівкових напівпровідникових, органічних матеріалів, їх принцип побудови та характеристики;

- описати моделі, що застосовуються для імітування фотоелектричних батарей, розглянути їх переваги і недоліки;

- провести дослідження із запропонованим варіантом підключення фотоелектричних перетворювачів;

- розробити схеми підключення фотоелектричних перетворювачів для підвищення продуктивності як фотоелектричних батарей індивідуального користування, так і сонячних електростанцій в цілому при низьких рівнях освітленості.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення променевої енергії у фотоелектричних елементах при різній комбінації послідовно-паралельного підключення.

Предмет дослідження – є фотоелектричні елементи та їх схеми підключення у батарею.

Наукова новизна отриманих результатів.

Удосконалено математичну модель фотоелектричного елемента при протіканні постійного струму, яка враховує його внутрішній опір, що дає можливість дослідити вплив умов експлуатації на його вихідні характеристики.

Практичне значення отриманих результатів.

Досліджено послідовне і паралельне з'єднання елементів фотоелектричної батареї. В результаті отримано вольт амперні характеристики при різних групах з'єднання фотоелектричних елементів. На основі цих даних запропоновано схему підключення фотоелектричних елементів у батарею, яка показує більшу ефективність при низьких рівнях освітленості.

Апробація. Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на ІХ Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 2021 року. ТНТУ [1]

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (14 найменувань). Загальний обсяг текстової частини – 71 сторінки, 2 таблиці, 29 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Розвиток нетрадиційної та поновлювальної енергетики в світі

Асоціація фотоелектричної енергії у Японії (Photovoltaic Energy Association) пророкує, що до 2030 року потужність сонячних станцій в країні досягне 100 ГВт. Індія планує збільшити потужність сонячних установок з 2 ГВт до 20 ГВт в середньостроковій перспективі. Останні тенденції в Індії показують, що вартість сонячної енергії досягла рівня 100 доларів за мегават, що можна порівняти з енергією, що отримується з імпортного вугілля або газу.[2]

Автономні сонячні установки і мікро-мережі розвиваються в Африці, де тільки 30 відсотків території, розташованої на південь від Сахари, мають доступ до джерел енергії. Африка, як і інші регіони з потужною добувною промисловістю, розвивають сонячну енергетику як альтернативу дизельним електростанціям або як резервне джерело для ненадійних електромереж. Потрібно мати на увазі, що ціна кіловата сонячної енергії зменшується вдвічі кожні 2,5 року і зменшилася в 100 разів з 1977 року, причому не видно жодних причин для зміни цього тренда в майбутньому. Розрахунки показують, що 1 % наявних в світі пустель можуть забезпечити генерування всієї енергії, яку зараз використовує світ, а 25 % світових пустель можуть поставляти в 25 разів більше енергії, ніж ми зараз використовуємо.

Сьогодні розвиток світової цивілізації супроводжується значним збільшенням енергоспоживання, причому лідерами зростання стають країни, що розвиваються. Досить сказати, що у 2000 р. енергоспоживання Китаю становило лише половину від енергоспоживання США, то 2009 року [2] Китай вже випередив США за цим показником. Збільшення чисельності населення Землі, розвиток промисловості та зростання рівня життя населення супроводжується суттєвим зростанням енергоспоживання. З кожним роком підприємства, що генерують електроенергію, вимагають для себе все більше

вуглеводневого палива, запаси якого з кожним десятиліттям виснажуються, а видобуток його вимагає витрат дедалі більшої енергії та матеріальних витрат. Активно споживані природні запаси вуглеводнів, які ще недавно здавалися невичерпними, стають важкодоступними. Головне, що відновити їх вже неможливо, як і неможливо уявити хімічну промисловість майбутнього без вуглеводневої сировини.

Сьогодні основна частина світового енергобалансу покривається традиційними викопними органічними паливами – 78 % (вугілля, газ, нафта) і ядерною енергетикою близько 3 %. інші ВДЕ дещо більше 5% [3].

Сьогодні у світі вироблено основні напрямки розвитку енергетики. В першу чергу, це суттєвіше, ніж сьогодні, використання ресурсів відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) сонця, вітру, води та біоресурсів [4].

Відповідно до прогнозу Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) до 2030 р. на відновлювані джерела енергії припадатиме 29 % виробництва електроенергії та 7 % виробництва моторного палива [4]. У тих регіонах, де це неможливо через низький потенціал ВДЕ, необхідно розвивати атомну енергетику або раціонально споживати наявні ресурси органічної сировини.

Певні успіхи у цьому напрямі вже є. У той час, як традиційна енергетика, що базується на викопних органічних енергоресурсах, з початку XXI століття в середньому у світі зростала з темпом всього 1-1,5 % в рік, нові технології ВДЕ розвиваються із середніми темпами в десятки відсотків на рік [3].

Найбільший інтерес до ВДЕ супроводжувався зростанням фінансування з боку державних бюджетів і приватних компаній, виявлений країнами, що перебувають у сильній залежності від імпорту традиційних енергоресурсів (країни Європейського Союзу, США, Японія пізніше за Китай та ін.).

У відносно короткі терміни багато енергетичних технологій ВДЕ наблизилися до порога конкурентоспроможності з традиційними технологіями, що базуються на традиційних органічних енергоресурсах. Наприклад, вартість енергії та біопалива, вироблених за допомогою вітроустановок,

фотоелектричних перетворювачів, сонячних, теплових, геотермальних та біоенергетичних установок, вдалося знизити в рази [5].

Освоєння ресурсів ВДЕ розвивається нерівномірно [6]. Гідроенергетика була піонером використання ВДЕ, але сьогодні вже не розвивається такими темпами. Потенціал великих річок у світі локалізований, крім того, сьогодні його освоєно вже приблизно на третину. Неосвоєна його частина зосереджена переважно в країнах, що розвиваються, і подальший розвиток великої гідроенергетики обмежено, в тому числі екологічними обмеженнями (затоплення великих територій і т.п.).

Споживання традиційної біомаси у світі неухильно скорочується у зв'язку з переходом на досконаліші технології теплопостачання та приготування їжі.

Країни-лідери з інвестицій у ВДЕ – це Китай, США, Німеччина, Італія та Індія. Середні річні темпи зростання потужності енергоустановок на ВДЕ показують, що лідерами є технології фотоелектричного перетворення енергії та геліоустановки, тобто енергоустановки, що використовують енергію сонця. Тому зрозуміло, що найбільші інвестиції відзначені у сонячній енергетиці – 140 млрд. доларів США, а також у вітроенергетиці – понад 80 млрд. доларів США. У сонячній енергетиці інвестиції спрямовані насамперед створення дахових фотоелектричних установок у Німеччині, Італії та Великобританії, а також на будівництво декількох сонячних теплових електростанцій в Іспанії та в США.

1.2 Фотоелектричні елементи, модулі і батареї

Фотоелектричний сонячний елемент (ФСЕ) (рис. 1.1) – сонячний елемент на основі фото ефекту. Сонячний елемент є первинним перетворювачем фотоелектричної системи, який перетворює світлову енергію Сонця безпосередньо на електричну енергію. Тому енергоустановки на основі ФСЕ є найзручнішими для автономного енергопостачання [7].

Фотоелектричний сонячний елемент може бути наступних типів: монокристалічний, полікристалічний та аморфний (тонкоплівковий). Моно- та

полікристалічні елементи мають майже однаковий ККД (13÷20 %), який майже вдвічі вищий, ніж у сонячних елементів, виготовлених з дешевого аморфного кремнію.

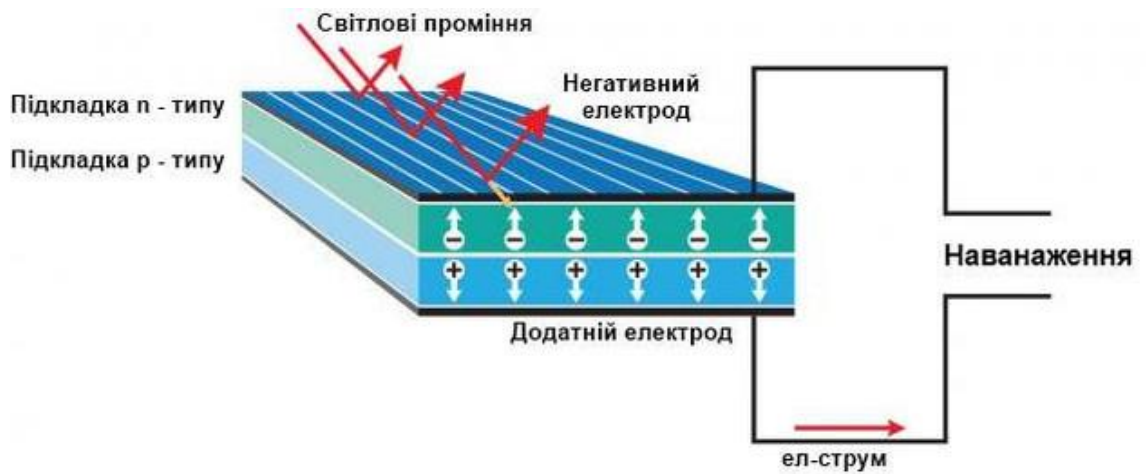


Рисунок 1.1 – Фотоелектричний сонячний елемент

Сонячні елементи (СЕ) виготовляють певний типорозмір. Вони можуть бути круглими (діаметром 100; 125 і 150 мм) або квадратними (82 x 82; 100 x 100 або 125 x 125 мм). Потужність елементів становить 0,9÷2,7 Вт [8]. У таблиці 1.1 наведено основні характеристики одиничного сонячного елемента.

Фотоелектрична батарея (модуль) (ФБ, ФМ) - пристрій, що конструктивно поєднує електрично з'єднані між собою фотоелектричні сонячні елементи і мають вихідні клеми для підключення зовнішнього споживача.

Потужність таких модулів становить від 10 до 300 Вт. У паспорті ФМ наводиться значення потужності, що генерується ним, при стандартних умовах (Standart Test Conditions), тобто, при сонячній радіації 1000 Вт/м^2 , температурі $+25^\circ\text{C}$ та сонячному спектрі на широті 45° [9]. На практиці сонячного випромінювання, що потрапляє на сонячний модуль, залежить від багатьох факторів, таких як його місцезнаходження, час доби, температура, кут нахилу модуля по відношенню до Сонця. Основною характеристикою як сонячного фотоелектричного модуля, так і окремого сонячного елемента є вольт-амперна характеристика (ВАХ). Вольт-амперна характеристика сонячного елемента (рис.1.2) – це залежність між струмом навантаження і напругою на клеммах

сонячного фотоелектричного елемента при постійних значеннях температури сонячних елементів і інтенсивності сонячного випромінювання, що надходить.

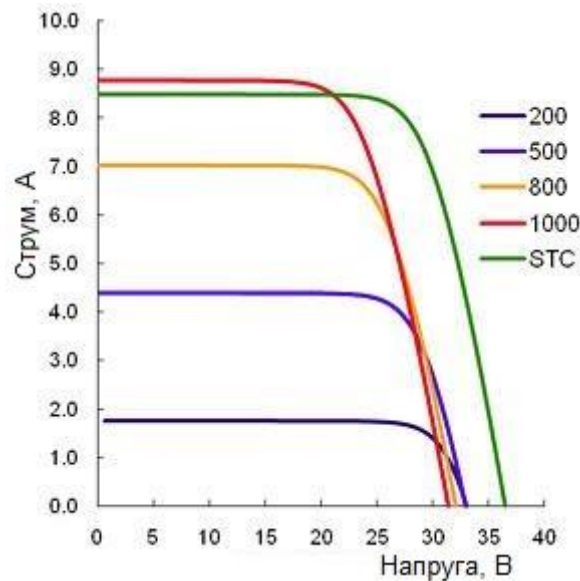


Рисунок 1.2 - ВАХ сонячного модуля (батареї)

Напруга, що відповідає максимальній потужності, називається напругою максимальної потужності (робочою напругою - U_p), а відповідний струм - струмом максимальної потужності (робочим струмом - I_p). Пікова потужність сонячного елемента – максимальна потужність фотоелектричного сонячного елемента за стандартних умов випробувань. ККД сонячного модуля визначається як відношення максимальної потужності модуля до загальної потужності випромінювання, що падає на його поверхню за стандартних умов, і становить від 13÷18 %, а в перспективних ФМ досягає 40 %.

З метою отримання необхідної потужності та робочої напруги модулі з'єднують послідовно або паралельно. Сонячна фотоелектричний масив (СФМ) – це з'єднані між собою електрично та механічно фотоелектричні модулі. Потужність сонячної батареї завжди нижча, ніж сума потужностей модулів - через втрати, обумовлені різницею в характеристиками однотипних модулів (втрати на неузгодженість). При послідовному з'єднанні десяти модулів з розкидом характеристик 10 % втрати становлять приблизно 6 %, а при розкиданні 5 % знижуються до 2 %. На основі сонячних фотоелектричних батарей будують сонячні фотоелектричні станції (СФЕС) [10] (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Структура сонячної фотоелектричної станції

1.3 Переваги фотоелектричних систем електроживлення

До основних переваг фотоелектричних систем можна віднести:

1. Відсутність рухомих частин, простоту установки, невичерпність енергетичного ресурсу, мінімальну потребу в догляді, відсутність шумів і вібрацій.
2. Вільне застосування в місцях відсутності централізованих електророзподільних мереж.
3. Швидка окупність сонячної батареї. Протягом всього терміну експлуатації генерується значно більше енергії, ніж було витрачено для будівництва електростанції.
4. Фотоелектричні елементи сонячної електростанції можна розмістити на будь-якій порожній площі, в тому числі і на дахах і стінах будинків, що, безумовно, істотно знижує її собівартість.
5. Немає необхідності використовувати будь-який вид палива.
6. У складі електростанції присутня тільки невелика частина рухомих частин, тому ефект зносу практично відсутній. Внаслідок цього сонячна

електростанція здатна без значного ремонту рухомих частин пропрацювати кілька десятиліть, крім звичайної періодичної очистки поверхні сонячних панелей.

7. Сонячна електростанція не вимагає трудомісткого технічного обслуговування для підтримки її в робочому стані.

8. Можливість підключення до «зеленого» тарифу (спеціальний тариф, за яким закуповується електрична енергія, генерована на об'єктах електроенергетики, що використовують альтернативні джерела енергії).

1.4 Нові фотоелементи на основі кристалічних плівок CuInSe_2 (CIS)

CuInSe_2 є ще одним перспективним матеріалом для фотоелектричних елементів. Сучасний рекорд ефективності для лабораторних пристроїв на основі CIS з додаванням Ga становить 19,5 %, що перевищує ефективність елементів на полікристалічному кремнії. Модулі комерційного розміру мають ефективність понад 13 %. Типова структура комірки на основі CIS складається з підкладки, на яку нанесено Mo, потім шар Cu (In-Ga) Se_2 (~ 1 мкм), потім CdS (~ 70 нм), поверх якого наноситься прозора провідна плівка ZnO (~ 350 нм). Були також виготовлені комірки з ефективністю 18,6 %, що не містять кадмію, в яких CdS замінений на ZnS. Для отримання крупнокристалічних плівок CIGS високої досконалості на різних етапах їх синтезу варіюють стехіометрію по міді і Індію. Одним з ключових аспектів технології є присутність натрію, для чого використовують Na-вмістне скло або натрій вводять додатково у вигляді різних солей в разі використання металевих або полімерних підкладок. Недоліком цих структур є складність отримання високоякісних плівок CIGS, обумовлена складністю фазової діаграми цього четверного з'єднання, а також деградація властивостей в результаті атмосферного впливу. Для підвищення надійності та ресурсу роботи фотоелементів на основі плівок CIGS необхідно зрозуміти механізми деградації їх властивостей і розробити ефективну технологію їх герметизації для тривалого використання в умовах атмосфери [3,5].

1.5 Нові фотоелементи на основі органічних матеріалів

Останнім часом фотоелектричні елементи на основі органічних матеріалів викликають все більший інтерес як дослідників, так і компаній, що виробляють фотоелектричні елементи. Це пов'язано з постійним зростанням ефективності цих пристроїв. Так в грудні 2009 року компанія Solarmer (США) повідомила про фотоефективності в 7,9 %, а вже в липні 2010 року ця ж компанія заявила про новий рекорд в 8,13%. Незважаючи на те, що ефективність фотоперетворення органічних фотоелементів виглядає досить скромно в порівнянні з неорганічними фотоелементами, однак ці пристрої мають цілу низку позитивних властивостей, завдяки яким вони складають реальну конкуренцію неорганічним елементам. До цих властивостей відносяться малі витрати і низька вартість матеріалів, їх екологічна безпека і дешева утилізація, дуже низька вартість виробництва, гнучкість модулів і пов'язане з цим зручність транспортування і монтажу. Завдяки цьому компанія Solarmer заявила, що найближчим часом вона досягне вартості електроенергії, виробленої органічними елементами, в 0,12-0,15 \$ / кВт · год або <math><1 \text{ \\$ / Вт}</math>, що відповідає кращим зразкам неорганічних тонкоплівкових фотоелементів другого покоління.

Органічні напівпровідники можуть бути як мономерами, наприклад, барвники, так і полімерами. Допірування органічних напівпровідників може бути здійснено введенням сторонніх атомів або молекул. Наприклад, р-типу напівпровідники отримують вводючи галогени, нітрогрупу, органічні молекули, такі як 2,4,7-тірнітрофлуоренон або орто-хлоранілу, а також напівпровідники з великою спорідненістю до електрону: фулерен або діамідпірілена. n-тип провідність можна отримати вводючи лужні метали або напівпровідники з низьким потенціалом іонізації.

Найпростішою архітектурою для полімерного фотоелемента є планарна гетероструктура, в якій на плівку фотоактивного полімеру (донор) наноситься

плівка електронного акцептора, на які з двох боків наносяться електроди. В даний час в якості фотоактивного матеріалу використовуються полімери з сполученими С-С зв'язками, модифіковані фулеренами. У полімерних напівпровідниках, на відміну від неорганічних напівпровідників, поглинений фотон генерує екситон, тобто електрон-діркову пару, пов'язану кулонівськими силами. Ця електронейтральна квазічастинка дифундує до донорно-акцепторної межі, де відбувається її дисоціація на вільні електрон і дірку, що формують фострум. Типова довжина дифузії екситонів в органічних напівпровідниках складає 1-10 нм. Такої ж товщини повинна бути і плівка фотоактивного полімеру, однак при такій товщині ця плівка має дуже низький коефіцієнт оптичного поглинання [3].

Недоліком фотоелементів на основі органічних матеріалів, крім невисокої ефективності фотоперетворення, є проблема стабільності властивостей, притаманна зв'язаним полімерам.

1.4 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз фотоелектричних перетворювачів, звернуто увагу на їхні характеристики в залежності від типу, структури та матеріалу.
2. Розглянувши всі види фотоелектричних перетворювачів, можна стверджувати, що в усіх них є одна спільна проблема, яка полягає у зменшенні їх ефективності при зниженій освітленості.
3. Встановлено, що при розробці схеми фотоелектричної батареї чи сонячної електростанції необхідно враховувати комплектацію фотоелектричних установок та схему їх підключення.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Опис фотоелектричної установки з підвищеною продуктивністю при зниженій освітленості

У процесі аналізу існуючих проблем в галузі сонячної енергетики був розроблений інженерним методом (тобто без втручання в хімічний склад) варіант з підтримки роботи фотоелектричних батарей в точці максимальної потужності тим самим, збільшуючи продуктивність фотоелектричних перетворювачів при роботі в ранкових і вечірніх сутінках.

Для підтримки роботи батарей в точці максимальної потужності (ТМП) використовується оптимальне співвідношення підключення ФЕП, що складаються з декількох груп з різною кількістю включених фотоелектричних перетворювачів (рис.2.1), які регулюють струм навантаження таким чином, щоб вихідна потужність фотоелемента була максимальною при даному рівні освітленості.

Пропонований варіант дозволяє виконати підключення як окремих фотоелементів однієї фотоелектричної панелі, так і безлічі фотоелектричних панелей в цілому, які будуть складатися з декількох груп з різною кількістю послідовно включених фотоелектричних перетворювачів, з відповідною напругою. На базі фотоелектричної батареї фірми «Квазар» була зібрана фізична модель розробленого варіанту схеми (рис.2.1) підключення ФЕП, для проведення ряду випробувань з метою підтвердження або спростування працездатності даної схеми і результатів розрахунку. ФЕП є по напрузі:

- в групі з 6-и перетворювачів сумарною напругою 2.88В;
- в групі з 4-х перетворювачів сумарною напругою 1.92В;
- в групі з 3-х перетворювачів сумарною напругою 1.44В;
- в групі з 2-х перетворювачів сумарною напругою 0.96В;

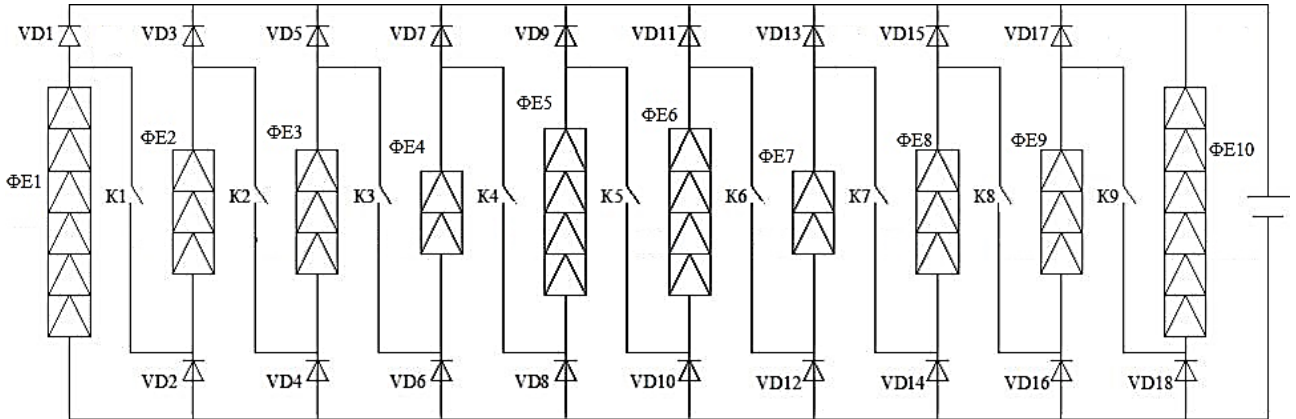


Рисунок 2.1 – Схема з'єднання ФЕП

Групи ФЕП розташовані в наступній послідовності: 6,3,3,2,4,4,2,3,3,6. Між групами від'ємні виходи груп підключені до мережі постійного струму акумуляторної батареї через напівпровідникові діоди VD1-VD18, включені в прямому напрямку, крім крайніх виходів від'ємного виходу першої групи, і додатного виходу останньої групи.

Наведена на рис 2.1 схема працює наступним чином. Використовуючи всього дев'ять ключів, буде здійснюватися регулювання набору певної кількості груп, які складаються з паралельно і послідовно включених фотоелектричних перетворювачів. При наявності достатнього освітлення, за допомогою комутуючих ключів збираємо групи з шістьма послідовно включеними перетворювачами (рис.2.2) з вихідною напругою по 0.47В кожного елемента і груп в цілому, і організуємо шість паралельно включених груп перетворювачів. При малій освітленості збираємо групи з дев'ятьма послідовно включеними перетворювачами (рис.2.3) з вихідною напругою по 0.47В кожного елемента і організуємо чотири паралельно включені групи перетворювачів. Таким чином, підвищуючи продуктивність фотоелектричних панелей при малій освітленості.

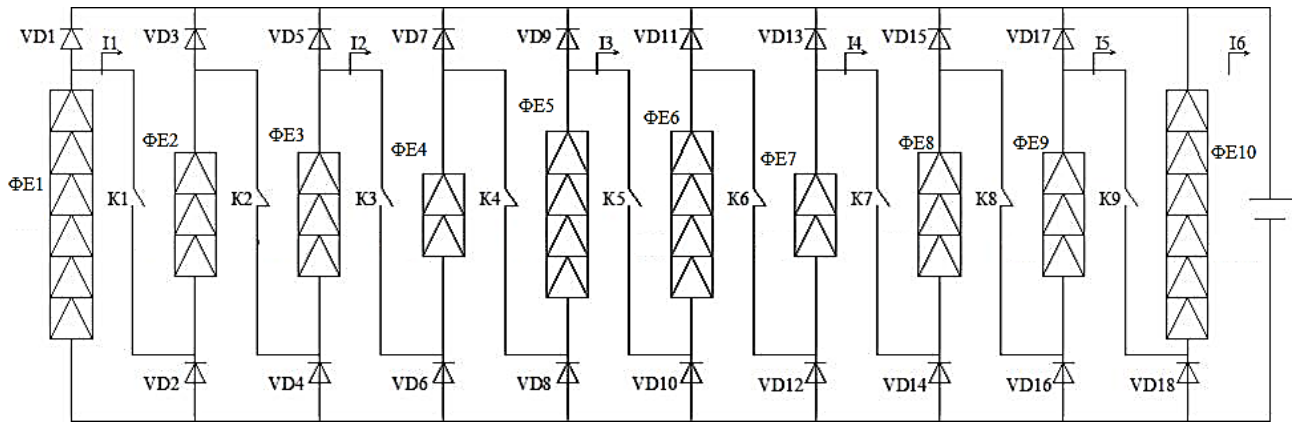


Рисунок 2.2 – Схема підключення ФЕП з 6 паралельних груп по 6 послідовно зібраних елементів

З рис.2.2 випливає:

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad (2.1)$$

$$U_{\text{вих}} = U_{\phi 2,3} = U_{\phi 4,5} = U_{\phi 6,7} = U_{\phi 8,9} = U_{\phi 10} \quad (2.2)$$

де

$$U_{\phi 2,3} = U_{\phi 2} + U_{\phi 3};$$

$$U_{\phi 4,5} = U_{\phi 4} + U_{\phi 5};$$

$$U_{\phi 6,7} = U_{\phi 6} + U_{\phi 7};$$

$$U_{\phi 8,9} = U_{\phi 8} + U_{\phi 9}.$$

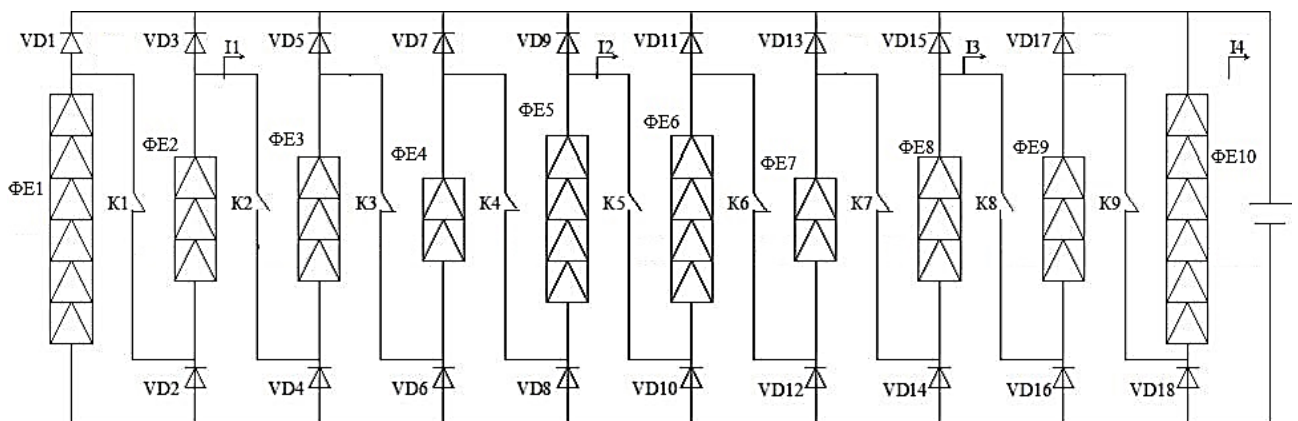


Рисунок 2.3 – Схема підключення ФЕП з 4 паралельних груп по 9 послідовно зібраних елементів

З рис.2.3 випливає:

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (2.3)$$

$$U_{aux} = U_{\phi 1,2} = U_{\phi 3,4,5} = U_{\phi 6,7,8} = U_{\phi 9,10} \quad (2.4)$$

де

$$U_{\phi 1,2} = U_{\phi 1} + U_{\phi 2};$$

$$U_{\phi 3,4,5} = U_{\phi 3} + U_{\phi 4} + U_{\phi 5};$$

$$U_{\phi 6,7,8} = U_{\phi 6} + U_{\phi 7} + U_{\phi 8};$$

$$U_{\phi 9,10} = U_{\phi 9} + U_{\phi 10}.$$

2.2 Аналіз математичних моделей для розрахунків потужності фотоелектричних батарей

Всі способи розрахунку потужності, яка генерується фотоелектричною батареєю, розраховуються використовуючи такі моделі:

- «модель ККД»;
- «модель поправочних коефіцієнтів»;
- «модель фізична»;
- «модель статистична».

У першій, найбільш простій моделі потужність, що генерується, вираховується шляхом множення ККД фотоелектричної батареї на потужність сонячного випромінювання, яка відповідає тому регіону України, де буде розташовуватися фотоелектрична батарея. Цей спосіб розрахунку має найбільшу похибку і носить оціночний характер.

Друга модель – модель, в якій вводяться ряд поправочних коефіцієнтів для врахування впливу ряду зовнішніх факторів на ККД фотоелектричної батареї:

$$\eta_{CDE} = r_{SP} \cdot r_T \cdot r_G \cdot r_{IA} \cdot r_X \cdot \eta_{STC}; \quad (2.5)$$

де η_{STC} – ККД фотоелектричних батарей, виміряний при стандартних умовах ($t = 25^{\circ}\text{C}$, АМ 1.5, потужність випромінювання 1000 Вт/м^2);

r_{SP} – коефіцієнт, що враховує відмінність спектру сонячного випромінювання від спектра АМ 1.5;

r_T – коефіцієнт, що враховує відмінність температури, при якій працюють фотоелектричні батареї, від стандартної;

r_G – коефіцієнт, що враховує відмінності між потужністю сонячного випромінювання і стандартною потужністю;

r_{IA} – коефіцієнт, що враховує кут нахилу фотоелектричних батарей.

До недоліків такої моделі можна віднести те, що ці коефіцієнти застосовуються лише для невеликої території. В цьому випадку похибка оцінки становить 20 %.

Третя модель – фізична, в якій розрахунок потужності фотоелектричних батарей проводиться на основі рішення рівнянь переносу для р-п переходу напівпровідникового матеріалу з урахуванням розігріву фотоелектричних батарей.

Четверта модель – статистична. При аналізі результатів наукових досліджень використовують методи обробки даних спостережень базуються на положенні теорії ймовірності та математичної статистики. Для статистичних методів побудови емпіричних залежностей дуже важливо, щоб результати спостережень підкорялися нормальному закону розподілу, тому перевірка нормальності розподілу – основний зміст попередньої обробки результатів спостережень.

Першим етапом регресійного аналізу є визначення ймовірного взаємовпливу параметрів один на одного [8]. Для цього, використовуючи множинний кореляційний аналіз, були розраховані парні коефіцієнти кореляції, що характеризують тісноту зв'язку між факторами, що впливають на роботу

фотоелектричної батареї. Потім, використовуючи парні коефіцієнти кореляції, був побудований наступний граф рис 2.4:

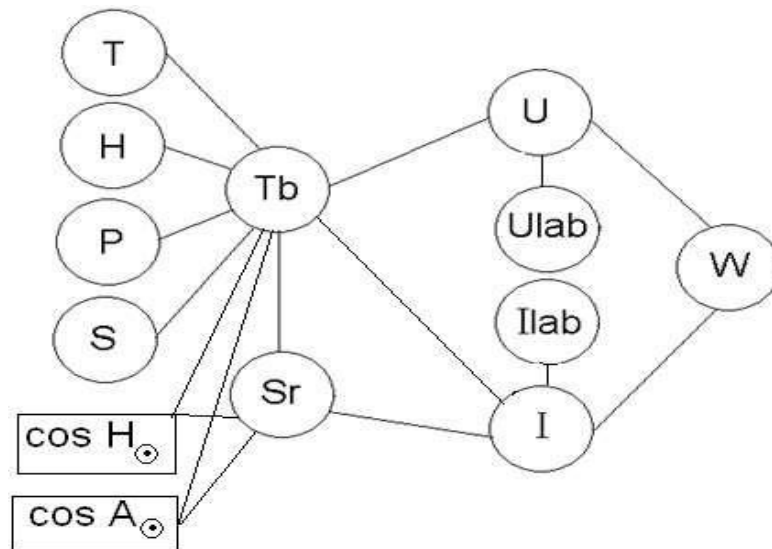


Рисунок 2.4 – Граф роботи фотоелектричних модулів

T – температура повітря; H – вологість повітря; P – тиск повітря; S – швидкість вітру; $\cos(H)$ косинус кута нахилу сонця над горизонтом, $\cos(A)$ азимут сонця, Tb – температура фотоелектричних елементів; Sr – сонячна радіація; Ulab, Ilab напруга і струм фотоелектричних елементів, виміряні в лабораторних умовах; W – потужність, що генерується фотоелектричними елементами

На рис. 2.4 прямими лініями позначені значущі парні коефіцієнти кореляції.

Відомо, що максимальна генерована потужність фотоелектричних батарей:

$$P = U_p \times I_p, \quad (2.6)$$

де U_p – робоча напруга;

I_p - робочий струм.

Зазвичай, при виробництві і наступних лабораторних випробуваннях фотоелектричних батарей в основному визначаються струм короткого замикання ($I_{кз}$) і напруги холостого ходу (U_{xx}). Відома формула, яка визначає залежність максимальної потужності, що генерується фотоелектричними батареями, від струму короткого замикання (КЗ) і напруги холостого ходу (ХХ).

$$P_{work} = K \times U_{xx} \times I_{кз}, \quad (2.7)$$

де K – коефіцієнт заповнення ВАХ;

Тоді можна записати:

$$U_p \approx K_{xx} \times U_{xx}, \quad (2.8)$$

$$I_p \approx K_{кз} \times I_{кз}, \quad (2.9)$$

де K_{xx} і $K_{кз}$ – коефіцієнти, що враховують вплив кліматичних, апаратних і технологічних факторів.

2.3 Аналіз роботи фотоелектричних батарей в залежності від природних факторів

2.3.1 Сонячне випромінювання

Перетворення енергії в фотоелектричних батареях засноване на фотовольтаїчному ефекті в неоднорідних напівпровідникових структурах при впливі на них сонячного випромінювання. На відміну від інших джерел струму характеристики сонячного елемента залежать від кількості світла, яке падає на його поверхню. Наприклад, набігла хмара може знизити вихідну потужність більш ніж на 50 %. На вихідні параметри фотоелектричної батареї буде впливати не тільки сумарна сонячна радіація, а й розташування сонця на небосхилі. Чим ближче розташування сонця до зенітного розташування, тим більший струм буде виробляти фотоелектрична батарея, але при цьому буде мати місце і сильніший розігрів робочої поверхні фотоелектричної батареї.

Іонізуюче випромінювання (рис.2.5) [9] зменшує значення струму короткого замикання, напруги холостого ходу і максимальної потужності фотоелектричного елементу GaInP₂ / GaAs / Ge.

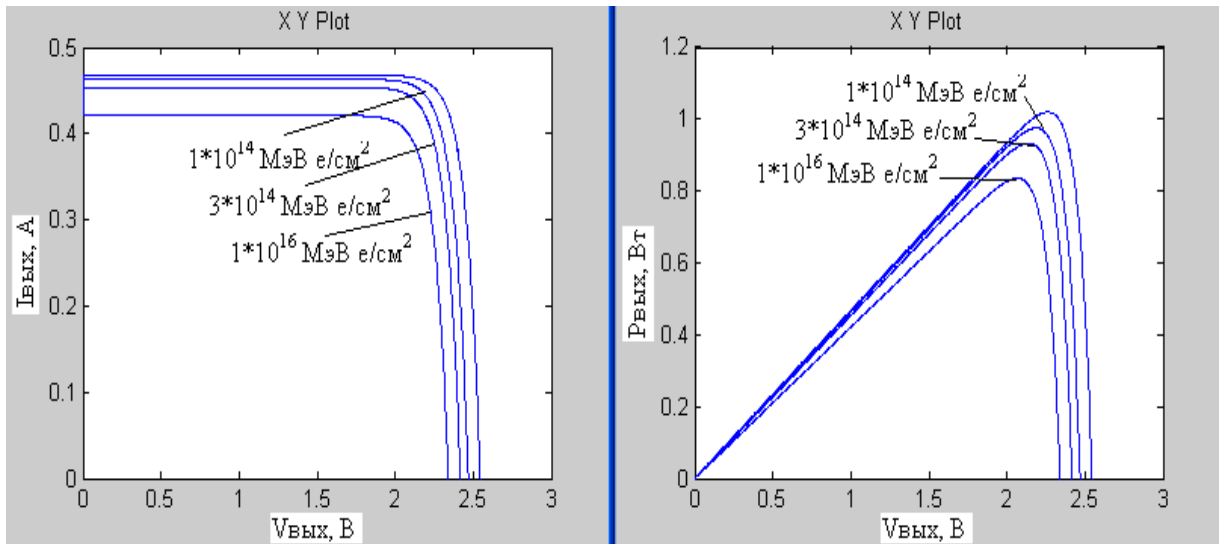


Рисунок 2.5 – Вихідні характеристики GaInP₂ / GaAs / Ge CE без опромінення і під дією радіаційного опромінення $1 \cdot 10^{14}$, $3 \cdot 10^{14}$, $1 \cdot 10^{16}$ MeV електрон / см²

2.3.2 Температура повітря і швидкість вітру

При роботі фотоелектричної батареї без охолодження в ній виділяється велика кількість теплової енергії і робоча температура зростає. Значне підвищення температури впливає на концентрацію носіїв заряду, а також на процес поглинання світла, в результаті чого змінюються вихідні параметри фотоелектричної батареї. Зрозуміло, що робоча температура фотоелектричної батареї буде залежати від температури навколишнього повітря [10].

З рис 2.6 [8] випливає, що при збільшенні температури фотоелектричної батареї з 10 °C до 50 °C ($\Delta T = 40$ °C) напруга холостого ходу зменшується з 19 до 12 В, а ККД падає з 13 % до 5 %. При цьому різниця температури повітря і фотоелектричної батареї становить від 10°C до 30 °C. У попередньому пункті даної роботи температура сонячної батареї не вимірювалася, і тому не були

чітко оцінені залежності параметрів фотоелектричної батареї від її температури. За результатами даного експерименту можна сказати, що температурний коефіцієнт напруги холостого ходу $\Delta U_x / \Delta T = -0,2 \text{ В}/^\circ\text{С}$; температурний коефіцієнт ККД $\Delta \eta / \Delta T = -0,22 \text{ \%}/^\circ\text{С}$.

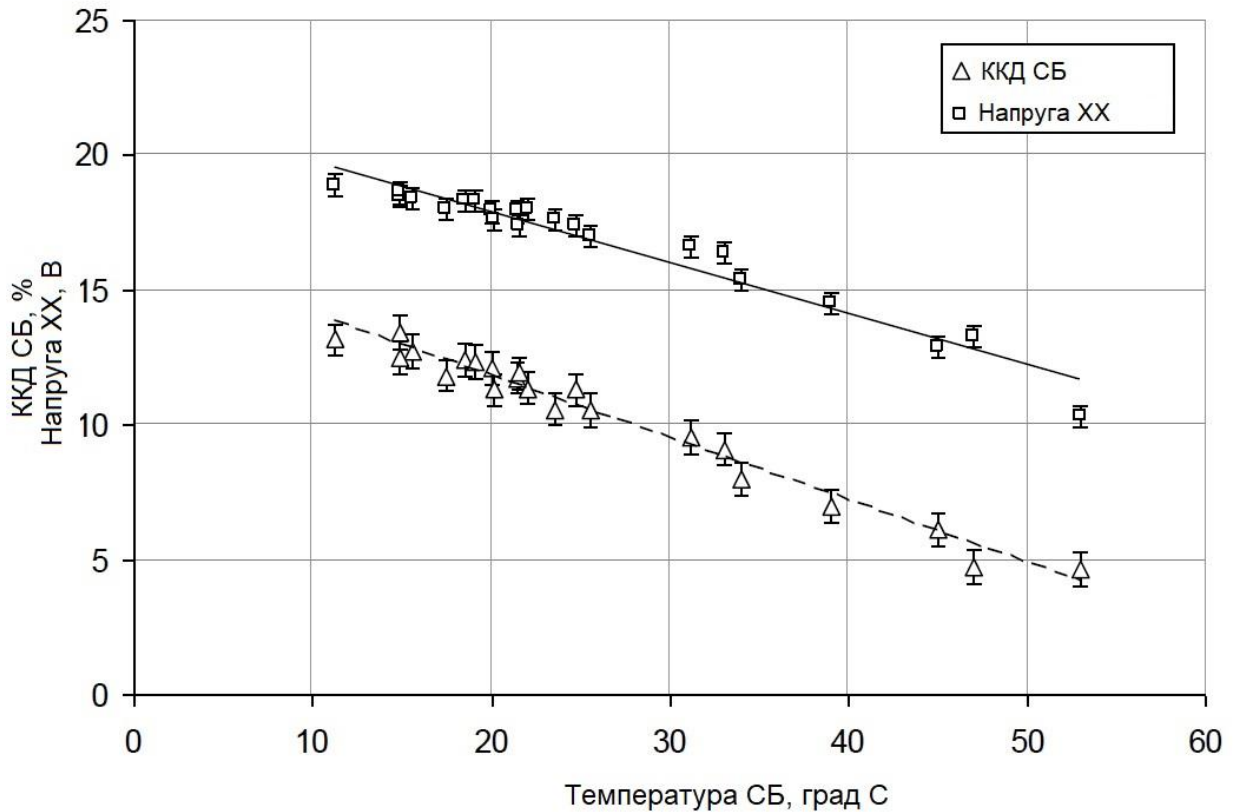


Рисунок 2.6 – Залежності параметрів сонячної (фотоелектричної) батареї від робочої температури

Результати моделювання ВАХ і ВВХ модуля НІТ215N, виготовленого з монокристалічного кремнію з тонкою плівкою аморфного кремнію, під дією різних температур представлено на рис 2.7 [9]

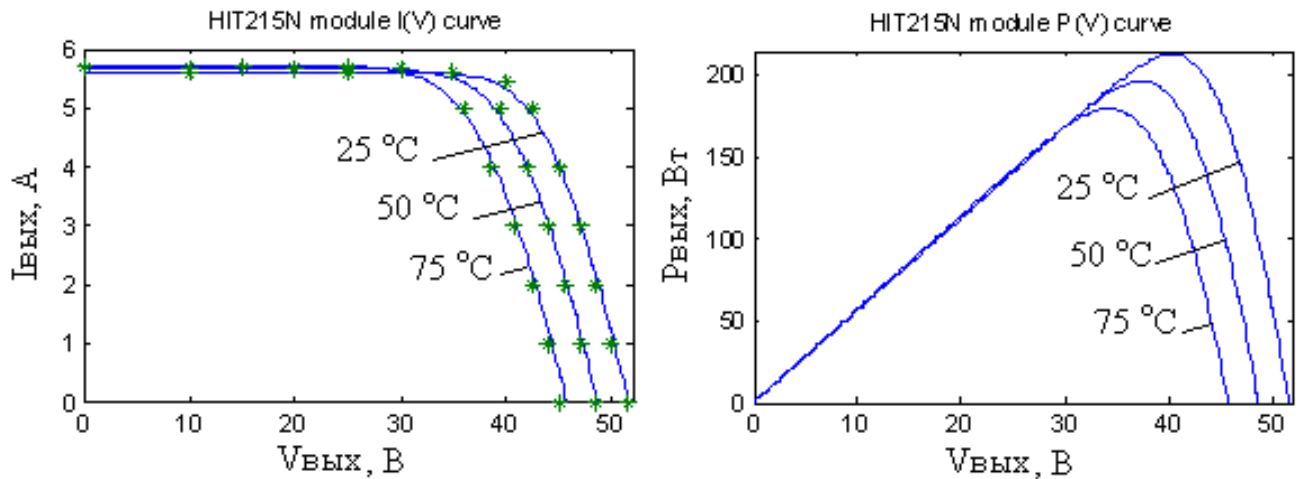


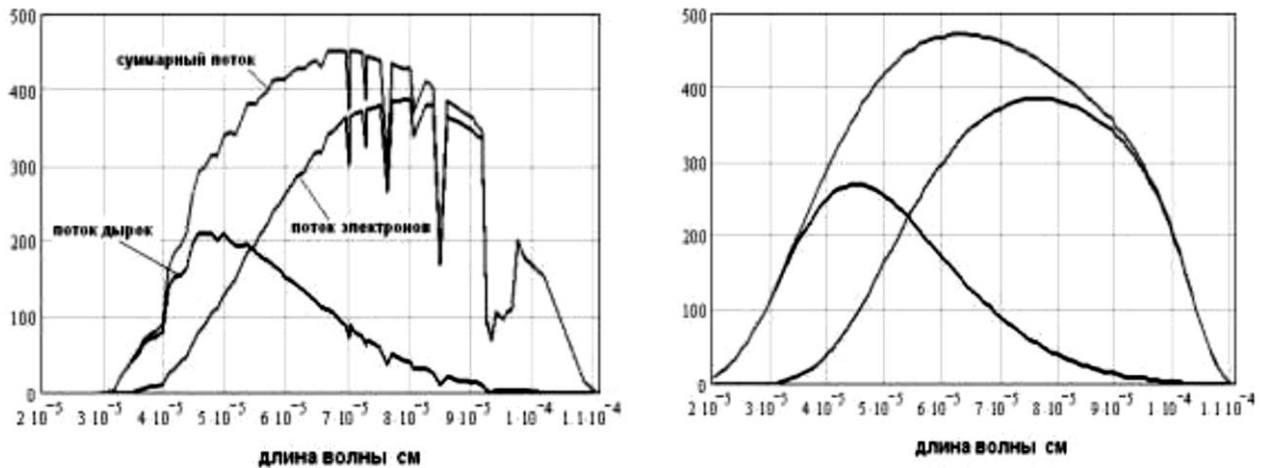
Рисунок 2.7 – Моделювання впливу різних температур на вихідні характеристики модуля HIT215N

Слід зазначити вплив швидкості вітру, яка може служити природною конвекцією. Тому при розробці моделі необхідно враховувати цей параметр.

2.3.3 Вологість і тиск повітря

Також на параметри фотоелектричної батареї впливає вологість повітря, по-перше, тому що одна зі смуг поглинання водяної пари лежить в спектральній області роботи фотоелектричної батареї; по-друге, вологість може впливати на процеси теплообміну між фотоелектричною батареєю і навколишнім середовищем. З використанням фізичної моделі будувалися графіки залежності потоків електронів, дірок і сумарного потоку від довжини хвилі для $AM = 1.5$, і випромінювання абсолютно чорного тіла з температурою 5800 K.

Як видно з рис. 2.8 [8], теоретичний струм короткого замикання прямо пропорційний площі фігури, обмеженої кривою сумарного потоку. У разі застосування функції Планка теоретичний струм короткого замикання виявляється на 20 – 25 % більше струму КЗ, при розрахунку якого використовувався реально виміряний спектр.



а – при реально виміряному спектрі б) при апроксимації

Рисунок 2.8 – Залежності потоків електронів, дірок і сумарного потоку від довжини хвилі для AM1.5

Таким чином, видно, що чим більше буде міститися вологи в повітрі, тим сильніше буде відбуватися поглинання сонячної радіації. У вивченні поглинання радіації водяною парою широко використовується поняття обложеного шару води. Величина обложеного шару води, що припадає на 1 км, пов'язана з абсолютною вологістю і тиском повітря.

2.4 Висновки до розділу

1. Запропоновано, для підтримки роботи батарей в точці максимальної потужності використовувати оптимальне співвідношення підключення фотоелектричних перетворювачів, що складаються з декількох груп з різною кількістю включених фотоелектричних перетворювачів які регулюють струм навантаження таким чином, щоб вихідна потужність батареї була максимальною при даному рівні освітленості.
2. Проведено аналіз способів розрахунку потужності, яка генерується фотоелектричною батареєю.

3. Представлено аналіз роботи фотоелектричних батарей в залежності від природних факторів.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Математична модель сонячного елемента при протіканні постійного струму

У розділі представлено розрахунок та проектування фотоелектричної батареї. В ідеалі повинно враховуватися все – і географічні координати проживання, і параметри конкретної моделі фотоелектричних елементів, які використовуються. Це дозволить розташувати сонячну батарею під потрібним кутом для отримання максимальної потужності в конкретній місцевості. А при заданих параметрах потужності це дозволить обійтися найменшою кількістю фотоелектричних елементів. Правда, для цього треба задатися проміжком реального часу, протягом якого повинна буде забезпечуватися задана потужність фотоелектричної батареї. Адже, чим ближче до сходу або заходу, тим менше світловий потік, а значить, і забезпечується потужність всієї батареї. Тут для прикладу наведено розрахунок для навантаження постійного струму на 12 В при струмі навантаження 1 А і перерахунок і підключення до навантаження змінного струму напругою 220 В.

Оскільки дані установки є в достатній мірі новим словом в техніці, необхідно пояснити їх роботу на прикладі одиничного елемента. На рис 3.1 представлена ідеалізована модель сонячного елемента [6]. Нижче наведено рівняння, що характеризує дану модель.

Рівняння, що визначають модель, представлену на рис 3.1, мають вигляд:

$$I_n = I_\phi - I_d, \quad (3.1)$$

$$I_d = I_o \times \left[\exp\left(\frac{V}{\varphi_T}\right) - 1 \right], \quad (3.2)$$

$$\varphi_T = \frac{k \times T}{e}, \quad (3.3)$$

де I_ϕ – струм фотонів, що залежить від щільності потоку випромінювання;

I_0 – струм, що протікає через ідеалізований р-п-перехід;

I_n – струм навантаження;

V – напруга на р-п-переході,

$\varphi_T = \frac{k \times T}{e}$ – тепловий потенціал, рівний контактній різниці потенціалів на

кордоні р-п-переходу при відсутності зовнішньої напруги (при $T = 300$ К, $\varphi_T = 0,025$ В);

e – заряд електрона;

k – стала Больцмана;

T – абсолютна температура.

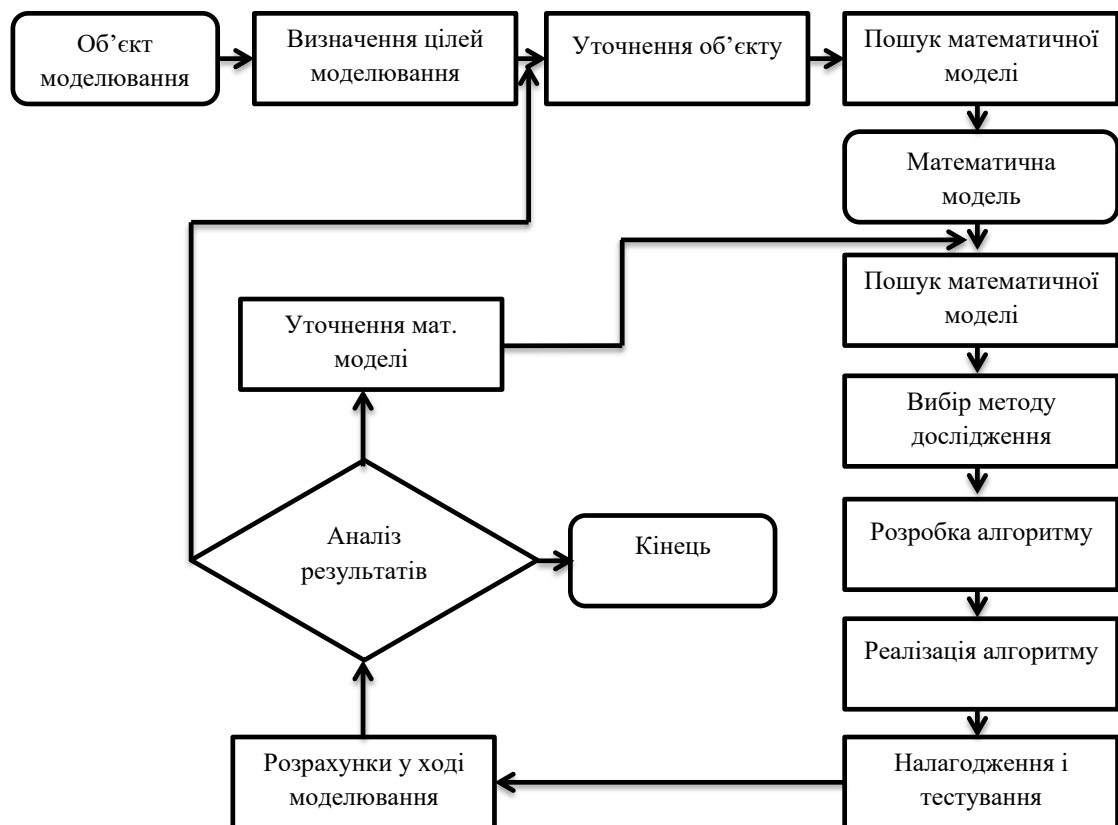


Рисунок 3.1 – Алгоритм побудови моделі фотоелектричної батареї

На підставі даного рівняння є не можливою побудова більш-менш точної ВАХ сонячного елемента. Дослідження впливу різних умов на вихідні

характеристики сонячного елемента привели до необхідності включення в рівняння сонячного елемента трьох додаткових параметрів: A , R_n , $R_{ш}$.

Тоді:

$$I_H = I_\phi - I_{0.H} \times \left[\exp\left(\frac{e \times V + I_H \times R_n}{A \times k \times T}\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{ш}}, \quad (3.4)$$

де A – емпіричний показник, який приймає значення від 1 до 5;

R_n – послідовний опір сонячного елемента;

$R_{ш}$ – шунтовий опір елемента;

I_H – вихідний струм навантаження;

I_ϕ – струм, що протікає через перехід фотодіода;

$I_{0.H}$ – зворотний струм насичення.

Еквівалентна схема даної моделі представлена на рис. 3.2.

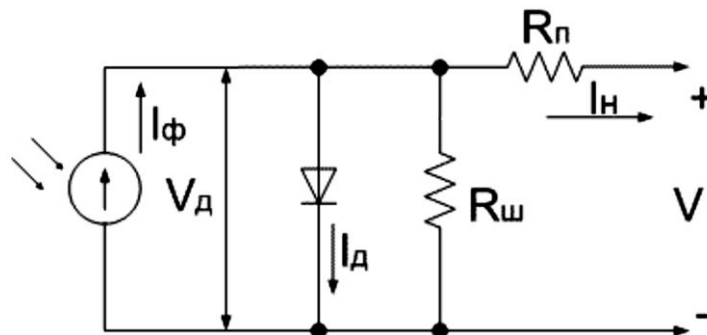


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема

Дана модель використовується при аналізі роботи фотоелектричних елементів і батарей, а також використана в наведених нижче розрахунках.

3.2 Визначення профілю освітленості

Профіль освітленості визначає випромінювання, яке надходить на фотоелектричну батарею, яка є функцією часу протягом світлого часу дня від

сходу до заходу, а також залежить від кута між напрямком на Сонце і площиною розташування фотоелектричної батареї. Розглянемо систему, розташовану на поверхні Землі, або в центрі фотоелектричної батареї. Точка має координати $L_{ш}$ широти і $L_{д}$ довготи. Місцевий цивільний час, або поясний час, визначається довготою стандартного меридіана $L_{С.М.}$

Сонце досягає найвищої точки на небі – zenіту під час справжнього півдня. У цей момент спостерігач бачить Сонце точно на півдні. Істинний сонячний час H_C пов'язаний з поясним часом H_{II} співвідношенням (3.5).

$$H_C = H_{II} + \frac{E_{y.B.}}{60} + \frac{L_{наб} - L_{С.М.}}{15}, \quad (3.5)$$

де $E_{y.B.}$ – є рівнянням часу (в хвилинах), що дорівнює різниці істинного і середнього сонячного часу, яке береться з рис. 3.3 – аналеми (H_C і H_{II} в годинах). З нього видно, що більший час року справжній сонячний час або випереджає, або відстає від нього [7].

Сонце, якщо спостерігати його рух з місця розташування згаданої вище еталонної системи, сходить на сході і заходить на заході (рис. 3.4).

На рис 3.4 Ψ – кут піднесення Сонця; A – азимутальний кут розташування Сонця. Видимий рух сонця по небосхилу описується рівняннями:

$$\sin \Psi = \cos L_{ш} \cdot \cos \delta \cdot \cosh + \sin L_{ш} \cdot \sin \delta, \quad (3.6)$$

$$\cos A = \frac{\sin \delta - \sin L_{ш} \cdot \sin \Psi}{\cos L_{ш} \cdot \cos \Psi}, \quad (3.7)$$

де A – азимутальний кут розташування Сонця, який вимірюється в горизонтальній площині в напрямку з півночі на південь;

Ψ – кут піднесення Сонця, який вимірюється в вертикальній площині;

$L_{ш}$ – широта точки розташування спостерігача (або об'єкта);

$L_{д}$ – довгота точки розташування спостерігача (або об'єкта);

h – годинний кут положення Сонця;

δ – кут схилення Сонця (рис. 3.5).

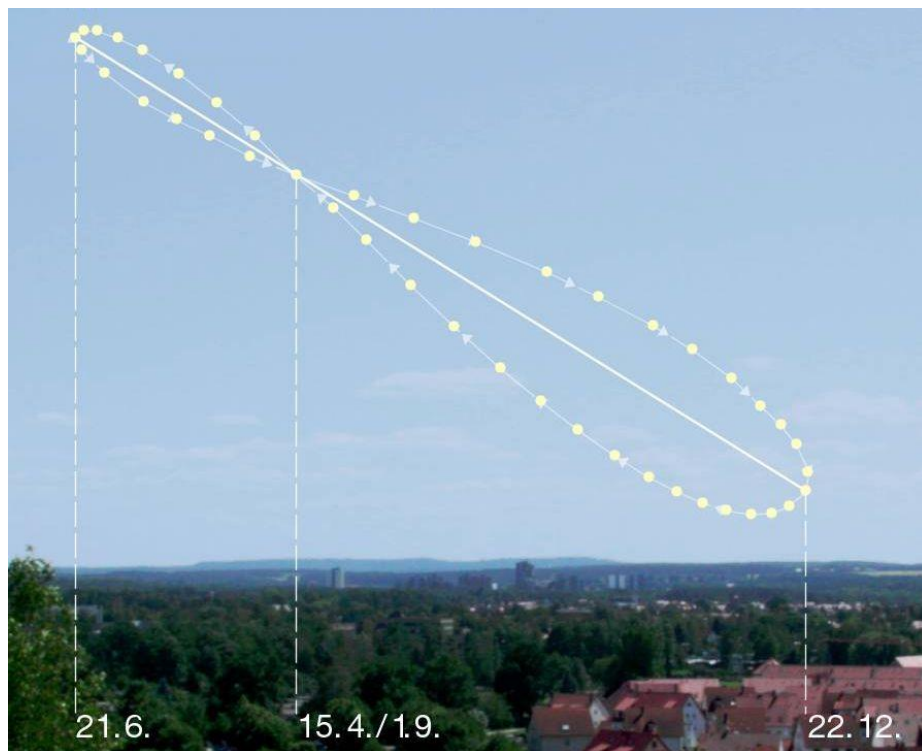
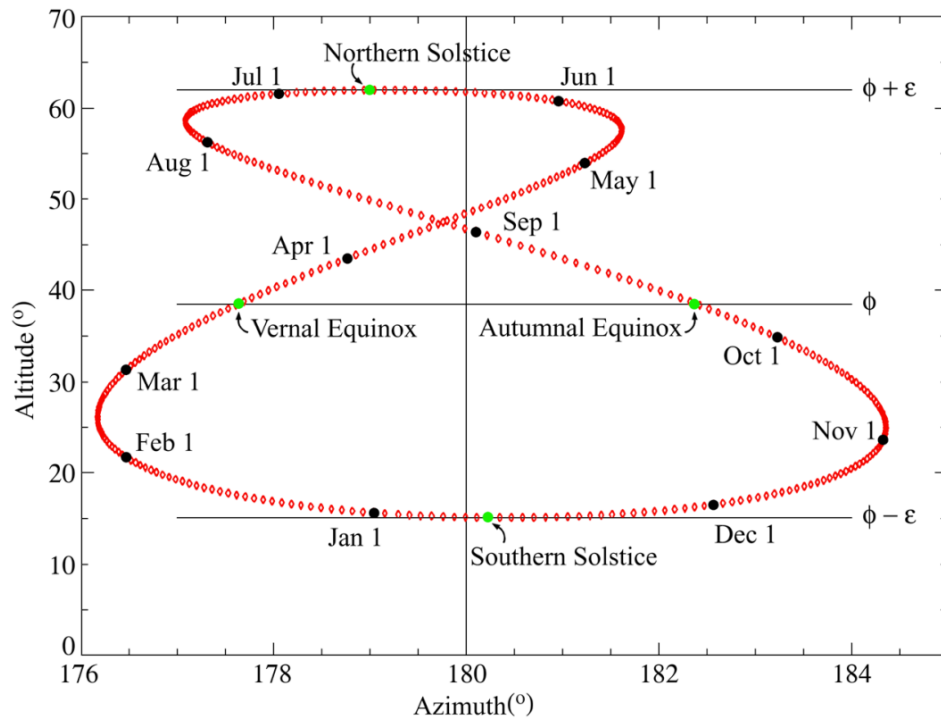


Рисунок 3.3 Аналема

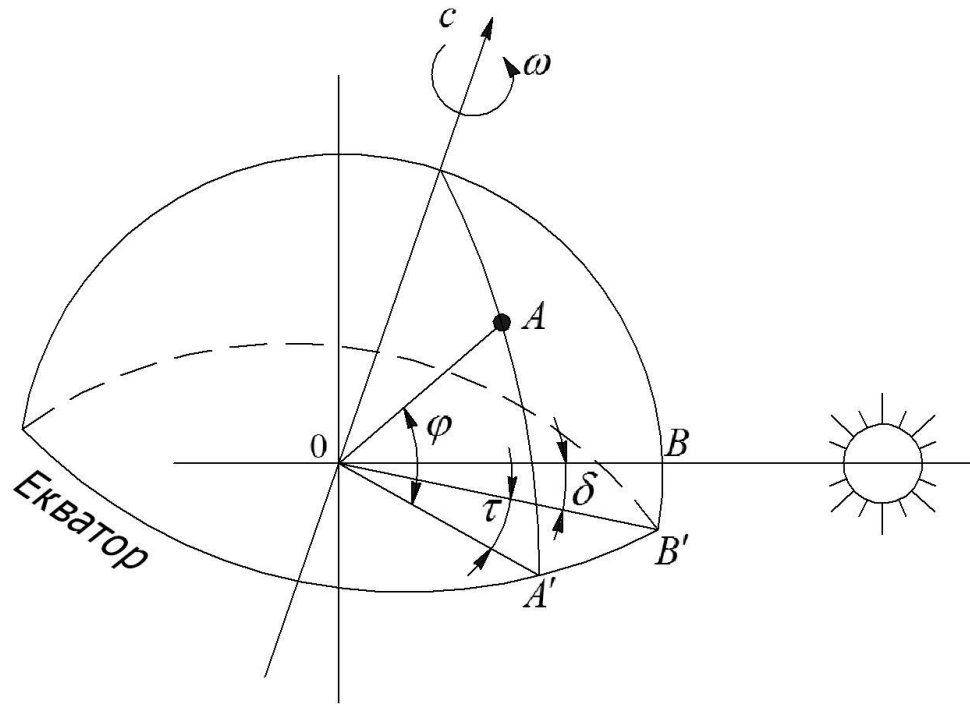
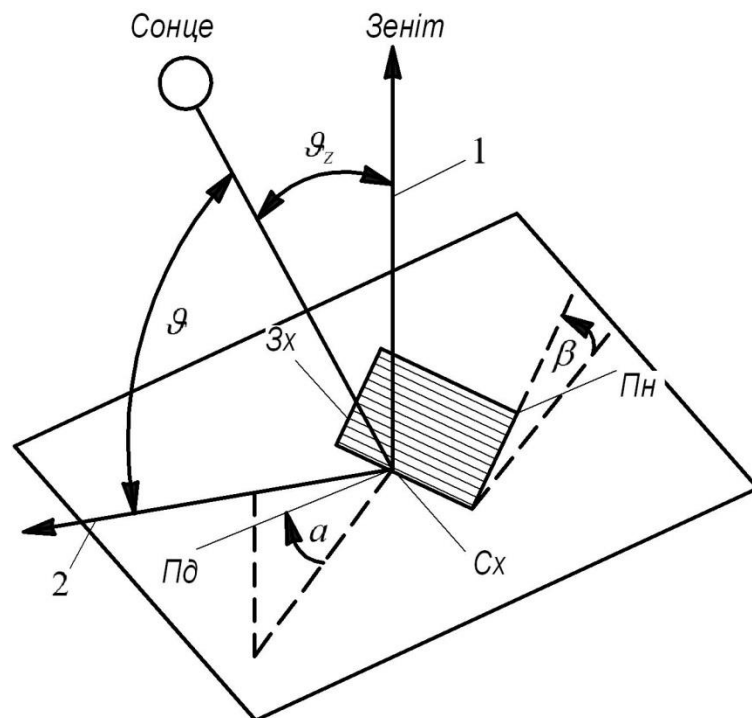


Рисунок 3.4 – Рух Сонця по небосхилу



g - кут падіння, $Z = g_z$;

β - кут нахилу;

a - азимут для похилої площини, $a < 0$;

1 - нормаль до горизонтальної площини,

2 - нормаль до похилої площини

Рисунок 3.5 – Положення фотоелектричної батареї відносно координат сонця

Годинний кут Сонця h визначається рівнянням, в якому H_C знаходиться з виразу [11]:

$$h = 15 \cdot (12 - H_C). \quad (3.8)$$

Приблизний час заходу і час сходу сонця, виражені в годинах і відповідають істинному сонячному часу, визначаються двома наступними рівняннями:

$$H_{IC.B} = \frac{1}{15} \cdot \arccos \operatorname{tg} L_{III} \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (3.9)$$

$$12^* H_{IC.B} = \frac{1}{15} \cdot \arccos -\operatorname{tg} L_{III} \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (3.10)$$

Число [12]* означає, що отримане значення відповідає дванадцятигодинному часу обчислення. Відповідні цим рівнянням поясні часи сходу і заходу визначаються з рівнянь (3.11) та (3.12).

$$H_{П.В} = H_{IC.B} - \frac{E_{У.В}}{60} + \frac{L_{наб} + L_{С.М}}{15}, \quad (3.11)$$

$$H_{П.З} = H_{IC.B} - \frac{E_{У.В}}{60} + \frac{L_{наб} + L_{С.М}}{15}, \quad (3.12)$$

Тривалість сонячного дня, виражену в годинах, знаходимо з рівняння (3.13).

$$H_{CO} = \frac{2}{15} \cdot \arccos -\operatorname{tg} L_{III} \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (3.13)$$

На наведеному нижче рис. 3.6 видно, що напрямки на схід і на захід утворюють з напрямком на дійсну північ в горизонтальній площині кути 90° і 270° відповідно. У літній період сонячна траєкторія зі сходу на захід видима з точки спостереження (рис. 3.6) під кутом, більшим 180° . Однак, плоскі

фотоелектричні батареї з фіксованим розташуванням, проектування яких буде розглядатися, не можуть використовувати всю енергію сонячного випромінювання при знаходженні Сонця за межами дуги в 180° . Кількість енергії, яке може бути використана, залежить від широти місцевості, де розташована сонячна батарея, від кута нахилу батареї щодо напрямлення на південь, а також від схилення Сонця і від пори року.

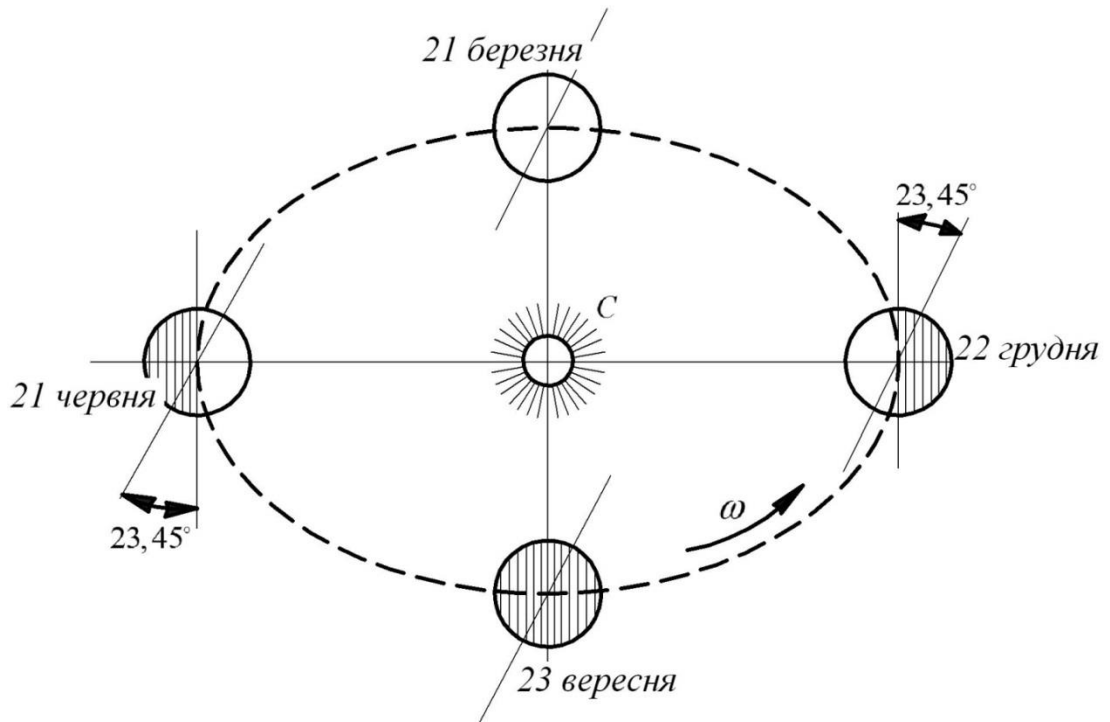


Рисунок 3.6 – Траєкторія руху Сонця за порами року

Кут нахилу фотоелектричної батареї позначимо α (див. рис. 3.7)

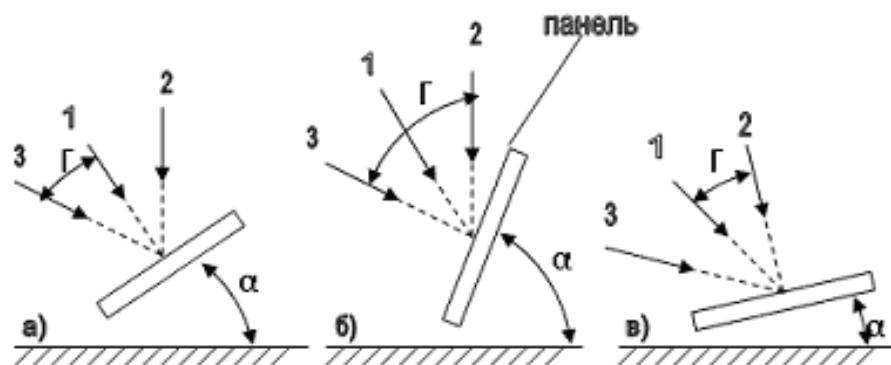


Рисунок 3.7 – Визначення оптимального нахилу панелі для весняного і осіннього рівнодення (а), для зимового періоду (б) і для літнього періоду (в)

Вираз (3.14) визначає кут Γ (рис. 3.7) між напрямком на Сонце і нормаллю до площини фотоелектричної батареї.

$$\cos\Gamma = \cos\theta \cdot \cos\alpha - \sin\theta \cdot \sin\alpha \cdot \cos\Psi, \quad (3.14)$$

де $\cos\theta = \sin\psi$, формула для визначення $\sin\Psi$ представлена вище;

$$\sin\theta = \sqrt{1 - \cos^2\theta} = \sqrt{1 - \sin^2\Psi}, \quad (3.15)$$

а в свою чергу $\cos\theta = \cos A$.

Формула для $\cos A$ визначена вище. Стрілками на рис. 3.7 показано напрямки падіння сонячного випромінювання: 1 – при рівноденні; 2 – влітку; 3 – взимку.

На початку проектування необхідно визначити кількість сонячного випромінювання, що падає на фотоелектричну батарею. Найбільш просто середню кількість сонячного випромінювання, що падає протягом дня на фотоелектричну батарею, виконану у вигляді плоскої панелі (або фотоелектричної батареї більш складної конфігурації) можна визначити за таблицями, в яких наведено кількість сонячного випромінювання, що падає на Землю. Такі дані є на метеостанціях для кожного міста чи прилеглої до станції території (довколишнього міста).

Знайдемо оптимальну величину кута нахилу фотоелектричної батареї. Знаючи інсоляцію в даному географічному місці, знаходимо, що мінімальна енергія сонячних променів характерна для січня і грудня. У ці два місяці схилення Сонця (див. рис. 3.3 – Аналемма) становить від $-17,5^{\circ}$ до $-23,5^{\circ}$. Середня величина відмінювання визначається через середнє арифметичне косинусів цих кутів:

$$\cos\delta_{cp} = \frac{\cos -17,5^{\circ} + \cos -23,5^{\circ}}{2} = \frac{0,954 + 0,917}{2} = 0,9355. \quad (3.16)$$

Звідки $\delta_{cp} = -20,7^{\circ}$. Звідси оптимальний кут нахилу (зимовий)

$$\alpha_0 = 52,2^0 + 20,7^0 = 72,9^0. \quad (3.17)$$

Правильність розрахунків можна перевірити іншим (метод без урахування значень інсоляції для даної місцевості) способом, де зимовий кут установки щодо горизонталі знаходиться як сума географічної широти плюс 15 градусів, тобто в даному випадку $52,2^0 + 15^0 = 67,2^0$. Літній кут, навпаки, є різницею між географічною широтою і 15 градусами, $52,2^0 - 15^0 = 37,2^0$.

При точних обчисленнях кут нахилу влітку складе:

$$\cos \delta_{cp} = \frac{\cos 23,5^0 + \cos 18,5^0}{2} = 0,9327. \quad (3.18)$$

Звідки $\delta_{cp} = 21,1^0$. Звідси оптимальний кут нахилу (літній)

$$\alpha_0 = 52,2^0 - 21,1^0 = 31,1^0. \quad (3.19)$$

У стаціонарному положенні (без електроприводу обертання) панелі необхідно орієнтувати на південь. Для постійної експлуатації вибирають зимовий варіант нахилу панелі (знову ж без електроприводу обертання). Тривалість сонячного освітлення, виражену в годинах, за умови ясної погоди можна знайти з:

$$H_{co} = \frac{2}{15} \cdot \arccos -tg L_{III} \cdot tg \delta. \quad (3.20)$$

При $\delta_{cp} = -20,7$ вона складе:

$$H_{co} = \frac{2}{15} \cdot \left[-tg 52,2^0 \cdot tg -20,7^0 \right] = 7,5 \text{ год}, \quad (3.21)$$

У грудні при $\delta = -23,5^0$ мінімальна тривалість сонячного освітлення згідно (3.22) складе 6,72 год. У червні при $\delta = 23,5^0$ максимальна тривалість сонячного освітлення складе 17,28 год.

$$H_{co} = \frac{2}{15} \cdot \arccos(-\operatorname{tg}L_{III} \cdot \operatorname{tg}\delta) , \quad (3.22)$$

На рис. 3.8 показана залежність тривалості сонячного освітлення H_{co} від схилення Сонця на широті 52.2° відповідно до виразу (3.20).

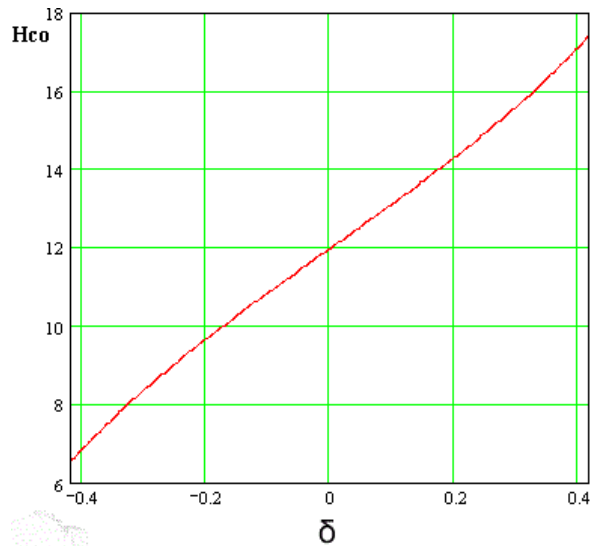


Рисунок 3.8 – Графічна залежність тривалості сонячного освітлення від кута схилення Сонця на широті $52,2^\circ$

На рис. 3.9 представлені ВАХ і ВВХ фотоелектричного модуля потужністю 10 Вт під дією різних рівнів освітленості.

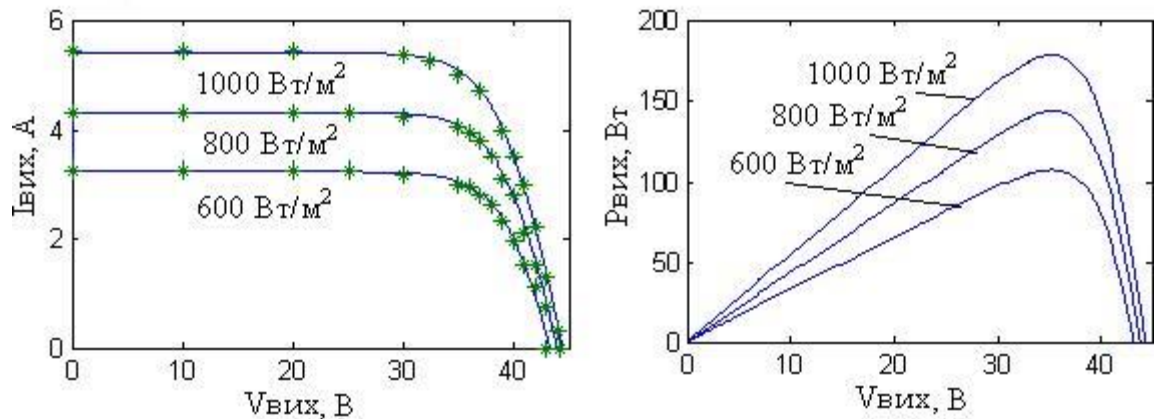


Рисунок 3.9 – ВАХ і ВВХ модуля «Квazar» 10W під дією різних рівнів освітленості

3.3 Визначення необхідної ємності і вибір акумуляторної батареї

Даний розрахунок потрібний при необхідності забезпечення роботи пристрою протягом доби [12]. Необхідна ємність акумуляторної батареї знаходиться з урахуванням її напруги, споживаної добової потужності, а також допустимої глибини розряду і визначається як:

$$C'_\delta = \frac{P_{НС}}{U_\delta \cdot \eta_P}. \quad (3.23)$$

де C'_δ – необхідна ємність батареї,

$P_{НС}$ – споживана навантаженням добова потужність,

U_δ – напруга акумуляторної батареї,

η_P – допустима глибина розряду, яку можна прийняти рівною $\eta_P = 80\%$.

З урахуванням вищевикладеного добова потужність $P_{НС}$ визначиться як:

$$P_{НС} = U_H \cdot I_H \cdot 24. \quad (3.24)$$

Якщо ми для прикладу виберемо навантаження з напругою живлення 12 В і струмом 1 А, то значення добової потужності знайдеться нами як:

$$P_{НС} = 12\text{В} \cdot 1\text{А} \cdot 24\text{год} = 288 \text{Вт} \cdot \text{год},$$

Тоді необхідна ємність акумуляторної батареї по

$$C'_\delta = \frac{P_{НС}}{U_\delta \cdot \eta_P}, \quad (3.25)$$

складе:

$$C'_\delta = \frac{288}{12 \cdot 0,8} = 30 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Але припустимо, що ми захочемо жити наш пристрій протягом 2-х днів від акумуляторів, наприклад, при ймовірності 2-х похмурих днів поспіль. Зрозуміло, вдвічі ми повинні будемо збільшити і ємність батареї. Тобто нам необхідна батарея ємністю $C'_\phi = 60 \text{ А} \cdot \text{год}$. З урахуванням ККД контролера заряду-розряду (близько 93 %) необхідна ємність батареї складе:

$$C_\phi = \frac{C'_\phi}{0,93} = \frac{60}{0,93} = 64,5 \text{ А} \cdot \text{год}. \quad (3.26)$$

Виберемо батарею типу СА 12650 з номінальною напругою 12 В, ємністю 68,5 А·год і максимальним струмом зарядки $I_3 = 16,3 \text{ А}$. Споживана при заряді максимальна потужність $P_{\text{цикл}}$ складе:

$$P_{\text{цикл}} = U_3 \cdot I_3. \quad (3.27)$$

де U_3 – максимальна напруга заряду в зимовий період,
 I_3 – максимальний струм заряду.

Звідси

$$P_{\text{цикл}} = 15 \cdot 16,3 = 244,5 \text{ Вт},$$

При навантаженні, яке задає струм в колі, що дорівнює $I_n = 1 \text{ А}$, розрядний струм буде дорівнює $I_p = 0,017 \cdot C20$, де C20 – загальна ємність батареї. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що розрахункова крива пройде вище кривої 0,05C20 і при часі розряду $t_p = 48 \text{ год}$ значення напруги на клеммах батареї складе близько $U_\phi = 11 \text{ В}$, що, в цілому, добре відіб'ється на роботі пристрою.

На рис. 3.10 представлені залежності ємності батареї у відсотках (по відношенню до номінального її значення) від числа циклів заряду-розряду для випадків 100-, 50- і 30 – процентної розрядки в кожному циклі. Кількість таких циклів, наприклад для 80 – процентної розрядки, прийнятої для двох днів

підряд роботи батареї, не більше двох-трьох десятків на рік (в залежності від наявності похмурих днів), і помітним чином не відіб'ється на втраті ємності батареї. На наведеному рис. 3.10 за стовідсоткову ємність прийнята ємність нового акумулятора. Після кількох перших циклів ємність дещо збільшується в порівнянні з початковою, тому криві піднімаються над 100 % рівнем.

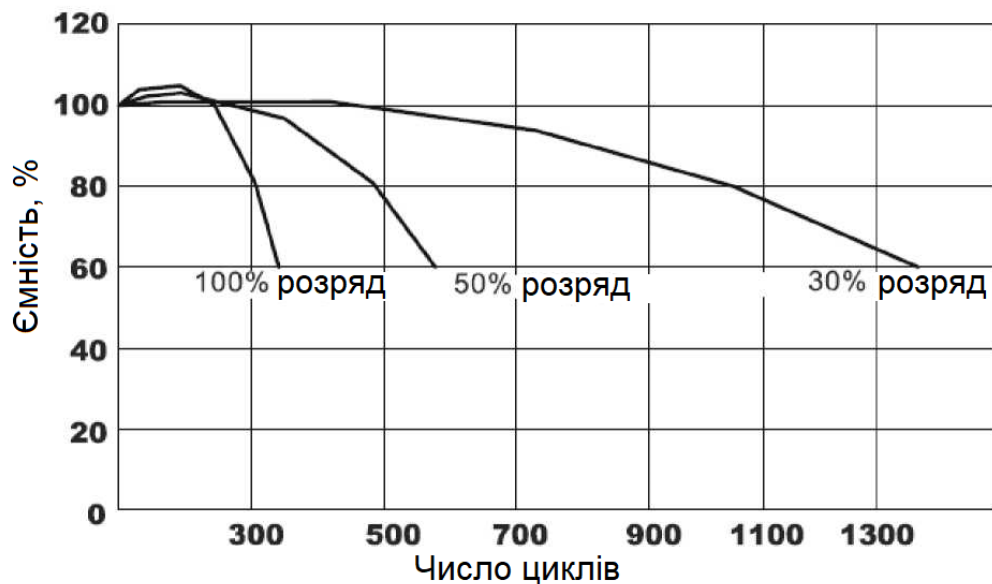


Рисунок 3.10 – Залежності ємності батареї у відсотках

З графіка на рис. 3.11 видно, що при температурі навколишнього середовища $T_{навк} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ємність батареї складе близько 75 % розрахункової ємності (крива $I_p = 0,03 \times C$ пройде вище кривої $I_p = 0,05 \times C$), тобто близько 51,4 А·год, що тим не менш узгоджується з розрахунковими даними, оскільки в морозні дні похмурість відсутня і для роботи пристроїв в темний час доби даної ємності буде достатньо. В крайньому випадку, допустимий стовідсотковий розряд акумуляторної батареї. При наявності похмурих днів в більш теплу погоду фактична ємність буде близька до розрахункової.

Всі обумовлені умови режиму експлуатації сприятливо позначаються на терміні служби акумуляторної батареї, що має скласти близько семи років.

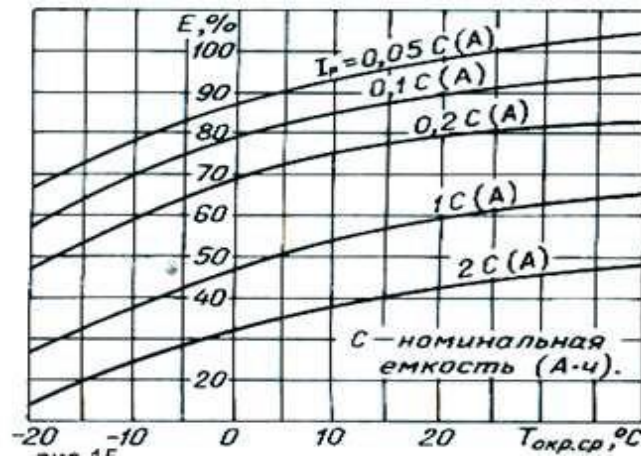


Рисунок 3.11 Залежність ємності батарей при різних значеннях струму розрядки від температури їх корпусу

3.4 Визначення мінімального часу зарядки акумуляторної батареї

Для організації безперервності живлення навантаження необхідно оцінити швидкість заряду акумуляторної батареї. При розряді частина напруги падає на внутрішньому опорі батареї $R_{внутр}$, тому на виході напруга становить близько 12 В. Відповідно, при заряді необхідно подати на вхідні клеми батареї, з урахуванням падіння напруги на опорі $R_{внутр}$, напругу більшу за ЕРС батареї на величину цього падіння. Енергія, що витрачається при розряді батареї, визначається за формулою (3.28)

$$W_p = U_p \cdot I_p \cdot t_p, \quad (3.28)$$

Енергія, витрачена на заряд батареї визначається за (3.29).

$$W_p = U_3 \cdot I_3 \cdot t_3. \quad (3.29)$$

де W_p , U_p , I_p , T_p і W_3 , U_3 , I_3 , T_3 – потужність, напруга, сила струму і час в режимі розряду і заряду відповідно. З урахуванням ККД заряду, рівного $\eta_3 = 0,8$ можна записати наступну рівність (3.30).

$$U_p \cdot I_p \cdot t_p = U_3 \cdot I_3 \cdot t_3 \cdot \eta_3. \quad (3.30)$$

Тоді час заряду складе

$$t_3 = \frac{U_P \cdot I_P \cdot t_P}{U_3 \cdot I_3 \cdot \eta_3}. \quad (3.31)$$

$$t_3 = \frac{12 \cdot 1 \cdot 48}{14,4 \cdot 16,3 \cdot 0,8} = 3 \text{ год}$$

Даний режим буде характерний для літнього періоду (+20° С) при наявності перед зарядом двох похмурих днів, тобто після дводобового розряду. Зарядна напруга $U_3 = 14,4$ В взята для літнього періоду.

У зимовий період в морози (-20° С) похмурість відсутня (ясне небо) і час заряду складе (при шести годинах роботи фотоелектричної батареї і вісімнадцяти акумуляторної батареї відповідно):

$$t_3 = \frac{12 \cdot 1 \cdot 18}{15 \cdot 16,3 \cdot 0,8} = 1,1 \text{ год або 1 год і 6 хвилин.}$$

Зарядна напруга $U_3 = 15$ В взята для зимового періоду. При проміжних температурах час заряду буде в межах (1,1 – 3) години, тому розрахунок не наводиться.

3.5 Визначення профілю навантаження

Гальванічні батареї здатні підтримувати на своїх електричних шинах майже постійну напругу навіть при досить великих короткочасних перевантаженнях, характерних для пускових моментів двигунів. Фотоелектричні елементи цієї властивості не мають. Різке збільшення струму зовнішнім навантаженням (більш ніж на 10% перевищує максимальний струм при даних умовах) може привести до тимчасового падіння вихідної напруги елементів. У зв'язку з цим необхідно включати акумуляторну батарею, яка працює в перехідних режимах. Батарея служить також джерелом енергії в темний час, а при появі сонячного випромінювання заряджається.

При додаванні в схему живлення споживачів змінного струму систему електропостачання необхідно доповнити інвертором. Деякі види інверторів поєднують в собі також і функції контролера заряду-розряду. Для правильної роботи всієї схеми необхідний підбір контролера заряду-розряду відповідно до параметрів роботи схеми. Вибір здійснюють, виходячи з робочої напруги акумуляторної батареї, струму навантаження і необхідних функцій самого контролера.

Для систем з напругою акумуляторної батареї $U_b = 12$ В виробники випускають контролери типу на різні номінальні струми. Їх типовими функціями є:

- оптимальний алгоритм заряду;
- динамічний захист від надлишкового заряду;
- захист від короткого замикання і холостого ходу;
- внутрішню температурну компенсацію;
- діагностику робочого статусу;
- індикацію стану заряду;
- захист від глибокого розряду;
- визначення стану заряду.

Виходячи з максимального струму заряду обраної акумуляторної батареї $I_s = 16,3$ А і номінального струму навантаження $I_n = 1$ А, застосуємо в складі системи контролер заряду-розряду JUTA DY2024.

Можливо також застосування контролера JUTA DY2024 з максимальним струмом заряду 20 А, що незначно відіб'ється на збільшенні мінімального часу заряду.

Для визначення сумарно споживаного навантаження при розрахунку потужності фотоелектричної батареї необхідно визначити навантаження питомого обладнання і потужність заряду батареї. Остання була визначена нами вище і склала $P_{цикл} = 244,5$ Вт.

Потужність обладнання:

$$P_H = U_H \cdot I_H. \quad (3.32)$$

де U_H і I_H – напруга і струм споживання навантаження відповідно споживана потужність складе:

$$P_H = 12 \cdot 1 = 12 \text{ Вт}$$

При визначенні потужності всієї системи необхідно також врахувати ККД контролера заряду-розряду, що дорівнює $\eta_K = 93 \%$. Тоді потужність всієї системи, а отже і фотоелектричної батареї, визначиться як:

$$P_{\sigma} = \frac{P_{\text{вих}}}{\eta_K}, \quad (3.33)$$

де

$$P_{\text{вих}} = P_{\text{цикл}} + P_H. \quad (3.34)$$

З урахуванням двох останніх виразів остаточна потужність фотоелектричної батареї складе:

$$P_{\sigma} = \frac{244 + 12}{0,93} = 275,81 \text{ Вт}$$

3.6 Розрахунок ефективного значення щільності потоку сонячного випромінювання

Це один з пунктів, необхідної для розрахунку кількості фотоелектричних елементів. Ефективне значення щільності потоку сонячного випромінювання є дійсним ефективним рівнем освітленості активної поверхні сонячного елемента і визначається за формулою:

$$S' = S \cdot \cos\Gamma \cdot F_{\text{ОПТ}}. \quad (3.35)$$

де $S \cdot \cos\Gamma$ – щільність потоку сонячного випромінювання за обраний період часу, виражена в одиницях сонячних сталих (1 од. = 1000 Вт/м²);

F_{opt} – коефіцієнт, враховує оптичну прозорість покриття (втрати на поглинання та відбиття) сонячного елемента (0,88 ÷ 0,90);

Γ – сумарний кут падіння випромінювання, виражений в градусах.

У грудні при максимальному рівні інсоляції для вертикально розташованої площини (її кут нахилу 90° найбільш близький до розрахункового кута $76,4^\circ$) сумарний місячний потік сонячного випромінювання

$$S_{ДЕК} \cdot \cos\Gamma = 21,3 \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2 \quad (3.36)$$

Тоді в середньому за день його значення складе:

$$S_{ДН} \cdot \cos\Gamma = 21,3 / 31 = 0,687 \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2.$$

А при прийнятій тривалості дня 6,72 год складе:

$$S \cdot \cos\Gamma = 0,687 / 6,72 = 0,102 \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2 \text{ в рік.}$$

У червні

$$S_{черв} \cdot \cos\Gamma = 100,8 \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2,$$

що в середньому за день складає

$$S_{ДН} \cdot \cos\Gamma = 100,8 / 30 = 3,36 \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2,$$

а при тривалості дня біля 17 годин складає

$$S \cdot \cos\Gamma = 3,36 / 17,28 = 0,194 \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2 \text{ в рік.}$$

В березні та вересні при сумарній щільності світлового потоку на вертикальну площину

$$S_{бер} \cdot \cos\Gamma = 104,9 \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2,$$

$$S_{\text{вер}} \cdot \cos\Gamma = 86,5 \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2,$$

його середнє значення за день і годину складає:

в березні

$$S_{\text{дн}} \cdot \cos\Gamma = 104,9 / 31 = 3,384 \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2,$$

$$S \cdot \cos\Gamma = 3,384 / 12,28 = 0,282 \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2,$$

у вересні

$$S_{\text{дн}} \cdot \cos\Gamma = 86,5 / 30 = 2,883 \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2,$$

$$S \cdot \cos\Gamma = 2,883 / 12 = 0,24 \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2.$$

Виходячи з вищенаведених розрахунків, за мінімальну середньогодинну розрахункову щільність сонячного потоку необхідно прийняти його значення в зимовий період, тобто приймається $S \cdot \cos\Gamma = 0,102 \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$. Таким буде середнє значення потужності світлового потоку за годину, що падає на вертикальну площину і реєструється широкосмуговими радіометрами. Для визначення дійсного ефективного рівня освітленості активної поверхні сонячного елемента з урахуванням оптичної прозорості його покриття необхідно скористатися формулою

$$S' = S \cdot \cos\Gamma \cdot F_{\text{опт}}. \quad (3.37)$$

У зимовий період це значення складе

$$S' = 0,102 \cdot 0,9 = 0,092 \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2.$$

Відповідно в літній період (червень)

$$S' = 0,194 \cdot 0,9 = 0,175 \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2.$$

3.7 Визначення факторів, які впливають на вихідну потужність фотоелектричних елементів

Використовуючи характеристики елементів, взяті в стандартних умовах, виберемо як найбільш потужні, елементи класу А1.

Стандартних умов вимірювань:

- освітленість 1000 Вт / м²;
- температура 25° С;
- спектр (атмосферна маса) 1,5.

Розміри фотоелектричної батареї визначають аналітичним, розрахунковим шляхом, виходячи з фізичних і електричних властивостей. Наприклад, вихідними потужностями, якими повинна володіти сонячна батарея в найбільш критичні моменти експлуатації часу. Для цього необхідно:

1) визначити для обраних елементів максимальну вихідну потужність P_E окремого сонячного елемента з урахуванням факторів, що впливають на його вихідні параметри за формулою:

$$P_E = P_o \cdot S' \cdot FT_{роб} \cdot F_K \cdot F_3 \cdot F_{Б.Д} \cdot F_{Г.Ф}, \quad (3.38)$$

де P_o – початкова вихідна потужність незаскленого сонячного елемента при нормальному падінні сонячного випромінювання (з щільністю, яка дорівнює одній сонячній константі) і еталонній температурі (25 або 28 °С) – 1,65 Вт;

$S' = S \cdot \cos\Gamma \cdot F_{ОПТ}$ – ефективна середньочасова щільність сонячного випромінювання з урахуванням покриття і неперпендикулярності падіння сонячного випромінювання (виражена в частках сонячної), обчислена вище і рівна $S' = 0,092$ кВт / м²;

F_K – фактор, що враховує комутаційні втрати (падіння напруги в міжелементних з'єднаннях і електропроводці, пов'язане з наявністю у них активного опору і з його зміною). У більшості випадків F_K приймає значення від 0,95 до 1,00;

$FT_{роб}$ – фактор, що враховує зменшення потужності зі збільшенням робочої температури.

Температурний коефіцієнт потужності для обраних елементів дорівнює $\beta_p = 0,48 \text{ \%}/\text{C}$, тобто потужність зменшується приблизно на 1/200 частину свого номінального значення на кожен градус різниці між робочою температурою і стандартною. В умовах літньої експлуатації фотоелектричні елементи нагріваються, в середньому, до температури $T_{раб} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ і втрати в потужності одного елемента P_{Pe} можна обчислити за формулою (3.39).

$$P_{Pe} = \beta_t \cdot T_{роб} - T_0, \quad (3.39)$$

де P_{Pe} – втрати потужності в процентах щодо номінальної потужності елемента P_e ;

β_t – температурний коефіцієнт потужності у відсотках;

$T_{роб}$ і T_0 – робоча і стандартна температура відповідно.

З огляду на це втрати складуть:

$$P_{Pe} = 0,48 \cdot 65 - 25 = 19,2\% .$$

Тоді літній коефіцієнт $F_{Троб.л}$ можна визначити як

$$F_{Троб.л} = 1 - \frac{P_{Pe}}{100}, \quad (3.40)$$

звідки літом

$$F_{Троб.л} = 1 - \frac{19,2}{100} = 0,808$$

У зимовий період допустимо прийняти $T_{раб} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, тоді

$$P_{Pe} = 0,48 \cdot 30 - 25 = 2,4\% .$$

і

$$F_{Троб.з} = 1 - \frac{2,4}{100} = 0,976$$

Реальна робоча напруга сонячного елемента $U_{роб}$ при його нагріванні під час роботи (що враховується влітку) знаходиться за формулою (3.41).

$$U_{роб} = U_{ОПТ} - T_{роб} - T_o \cdot \beta V . \quad (3.41)$$

де $\beta V = 0,002 \text{ В/}^\circ\text{С}$ – коефіцієнт, що враховує зменшення вихідної напруги елемента при його нагріванні в межах 0,002 В на градус, що проілюстровано на рис. 3.12.

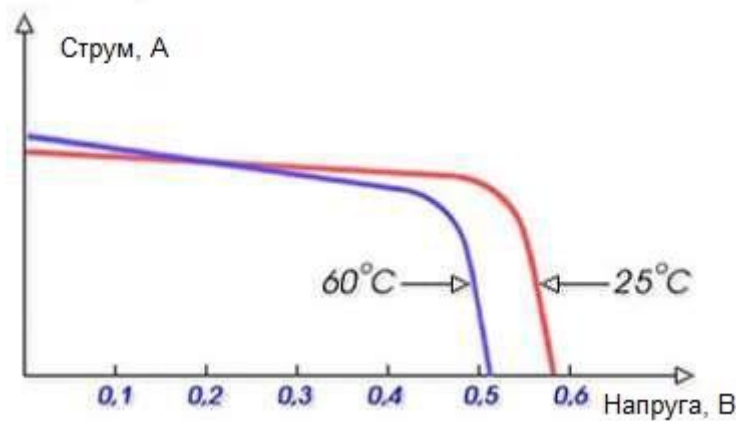


Рисунок 3.12 – Сімейство кривих ВАХ для температур 25 °C і 60 °C.

Виходячи з цього, робоча напруга одного елемента в літній і зимовий період, визначається виразом:

$$U_{роб} = U_{ОПТ} - T_{роб} - T_o \cdot \beta V . \quad (3.42)$$

складе відповідно:

$$U_{роб.л} = 0,524 - 65 - 25 \cdot 0,002 = 0,444 \text{ В}$$

$$U_{роб.з} = 0,524 - 35 - 25 \cdot 0,002 = 0,504 \text{ В}$$

Для нормальної роботи контролера заряду-розряду необхідно, щоб вихідна напруга на шинах фотоелектричної батареї становило близько 17 В.

Така напруга необхідно для компенсації втрат зниження робочої напруги батареї при її нагріві випромінюванням. Коефіцієнт $F_{Б,Д}$ розраховується за формулою:

$$F_{Б,Д} = 1 - \frac{V_{Д} + V_{П}}{V_{Ш} + V_{Д} + V_{П}}. \quad (3.43)$$

де $F_{Б,Д}$ – фактор, що враховує втрати в блокувальних діодах і проводах та визначається рівнянням, в якому:

$V_{Д}$ – падіння напруги на блокуючому діоді;

$V_{П}$ – падіння напруги в проводах, що з'єднують батарею і навантаження;

$V_{Ш}$ – напруга на шинах батареї.

З достатнім ступенем точності можна прийняти для фотоелектричних батарей потужністю до 1 кВт

$$V_{Д} + V_{П} = 1,4 \text{ В.}$$

$$F_{Г,Ф} = 1 / \pi. \quad (3.44)$$

де $F_{Г,Ф}$ – геометричний фактор, який іноді називається відношенням проєкцій.

Для плоских фотоелектричних батарей $F_{Г,Ф} = 1$, для циліндричних і обертових знаходиться за формулою (3.44).

При розрахунку $F_{Б,Д}$ отримаємо:

$$F_{Б,Д} = 1 - \frac{1,4}{17 + 1,4} = 0,924$$

F_3 – фактор, що враховує затінення і рівний відношенню дійсного вихідного струму короткого замикання до його теоретичного значенням, яке отримане для повного числа паралельно з'єднаних елементів при відсутності затінення. Струм короткого замикання пропорційний площі освітленого

елементу, тому коефіцієнт F_3 можна звести до визначення співвідношення освітленої і повної площ елементів. Тоді F_3 обчислити за формулою (3.45)

$$F_3 = \frac{A_{осв}}{A} \quad (3.45)$$

де $A_{осв}$ – освітлена частина елемента,
 A – загальна площа елемента.

При відсутності тіні для повністю освітленого елемента $F_3 = 1$. З огляду на розташування батарей на відкритій місцевості при наявності невеликого снігового покриву взимку і запиленості в літній період допустимо прийняти коефіцієнт $F_3 = 0,9$. Такім чином, отримані наступні значення величин:

$$P_o = 1,65 \text{ Вт};$$

$$S' = 0,092 \text{ (зимою)};$$

$$S' = 0,175 \text{ (літом)};$$

$$F_{Траб.з} = 0,976;$$

$$F_{Траб.л} = 0,8084$$

$$F_{\kappa} = 0,99;$$

$$F_{б. \delta} = 0,924;$$

$$F_{2. \phi} = 1;$$

$$F_3 = 0,9.$$

Згідно виразу

$$P_e = P_o \cdot S' \cdot F_{Траб} \cdot F_{\kappa} \cdot F_3 \cdot F_{б. \delta} \cdot F_{2. \phi}. \quad (3.46)$$

знаходимо потужність одного елемента P_e при найгірших умовах в зимовий час:

$$P_e = 1,65 \cdot 0,092 \cdot 0,976 \cdot 0,99 \cdot 0,9 \cdot 0,924 \cdot 1 = 0,122 \text{ Вт}$$

Відповідно в літню пору (червень)

$$P_e = 1,65 \cdot 0,175 \cdot 0,808 \cdot 0,99 \cdot 0,9 \cdot 0,924 \cdot 1 = 0,192 \text{ Вт}$$

2) визначити загальне число фотоелектричних елементів:

$$N'_{\text{заг}} = \frac{P_{\text{б}}}{P_e} = \frac{275,81}{0,122} = 2260,7. \quad (3.47)$$

Приймаємо попередньо $N'_{\text{заг}} = 2261$ елемент.

3.8 Визначення числа послідовно і паралельно з'єднаних елементів фотоелектричної батареї

Значне число фотоелектричних елементів треба з'єднати послідовно для отримання необхідної робочої напруги і додаткової напруги, що компенсує падіння напруги в блокуючому діоді і проводах. Знайдемо це число зі співвідношення

$$N_{\text{ПС}} = \frac{V_{\text{ш}} + V_{\text{д}} + V_{\text{п}}}{V_{\text{ОПТ}}}. \quad (3.48)$$

де $V_{\text{ОПТ}}$ – напруга сонячного елемента в точці максимальної потужності при робочих значеннях температури і щільності падаючого випромінювання.

$$N_{\text{ПС}} = \frac{17 + 1,4}{0,524} = 35,11.$$

Приймаємо $N_{\text{ПС}} = 36$ елементів. Таким чином, вихідна напруга на шинах фотоелектричної батареї при включеному навантаженні, що подається на вхід контролера заряду-розряду, складе

$$U_{\text{Б.ВИХ}} = (36 \cdot 0,524) - 1,4 = 17,5 \text{ (В)}.$$

За умови нагріву елементів до 65°C (влітку) втрати на один елемент складуть:

$$\begin{aligned} U_{II} &= T_{\text{раб}} - T_o \cdot \beta V, \\ U_{II} &= 65 - 25 \cdot 0,002 = 0,08 \text{ В}. \end{aligned} \quad (3.49)$$

Відповідно вихідна напруга складе:

$$U_{B.VIX} = 36 \cdot (0,524 - 0,08) - 1,4 = 14,6 \text{ В}.$$

Взимку ці величини складуть:

$$U_{II} = (35 - 25) \cdot 0,002 = 0,02 \text{ В}.$$

$$U_{B.VIX} = 36 \cdot (0,524 - 0,02) - 1,4 = 18,14 \text{ В}.$$

Число паралельно з'єднаних елементів N_{II} можна визначити виходячи із загальної кількості елементів N_{3AG} за формулою (3.50)

$$N_{II} = \frac{N_{3AG}}{N_{IC}}. \quad (3.50)$$

Виходячи з цього, число паралельно з'єднаних елементів складе:

$$N_{II} = \frac{2261}{36} = 62,8.$$

Таким чином, кількість паралельно з'єднаних кіл елементів можна прийняти рівним $N_{II} = 63$. Отже, загальна кількість елементів з урахуванням прийнятих значень послідовно і паралельно з'єднаних фотоелектричних елементів щодо N_{3AG} з урахуванням того, що

$$N_{IP} = \frac{N_{3AG}}{N_{IC}}. \quad (3.51)$$

Визначиться як:

$$N_{3AG} = N_{IP} \cdot N_{IC}. \quad (3.52)$$

тобто

$$N_{3AG} = 63 \cdot 36 = 2268.$$

Таким чином, при найгірших умовах потужність одного елемента влітку дорівнює $P_e = 0,19$ Вт при напрузі $U_e = 0,444$ В, взимку $P_e = 0,122$ Вт при $U_e = 0,504$ В. Потужність всієї батареї складе в зимовий період

$$P_{б.макс} = P_e \cdot N_{3AG}. \quad (3.53)$$

тобто

$$P_{б.макс} = 0,122 \cdot 2268 = 276,7 \text{ Вт},$$

що з незначним запасом перевищує розрахункову потужність, і в літній період

$$P_{б.макс} = 0,192 \cdot 2268 = 435,5 \text{ Вт}.$$

Схематичне зображення отриманих розрахунків наведено на рис. 3.13.

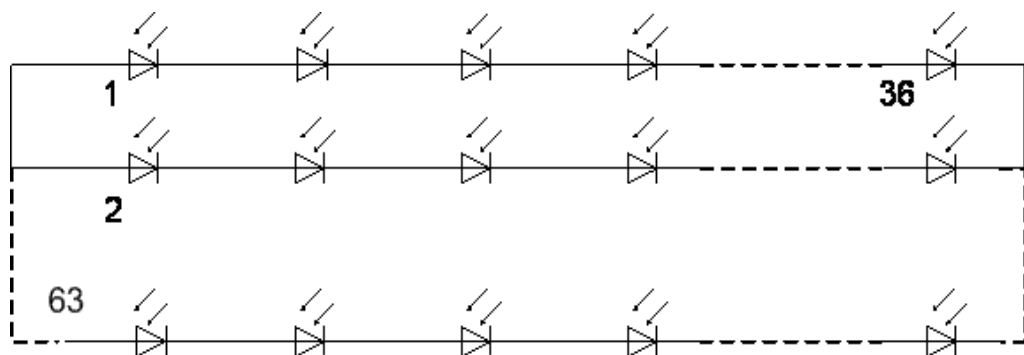


Рисунок 3.13 – Паралельне з'єднання 63 послідовних кіл елементів, що містять по 36 елементів

Послідовний опір R_s залежить від технології виготовлення фотоелектричного елемента і сильно впливає на його характеристики: при

зменшенні R_s зменшується коефіцієнт заповнення F_F і максимальна потужність P_{max} (рис. 3.14)

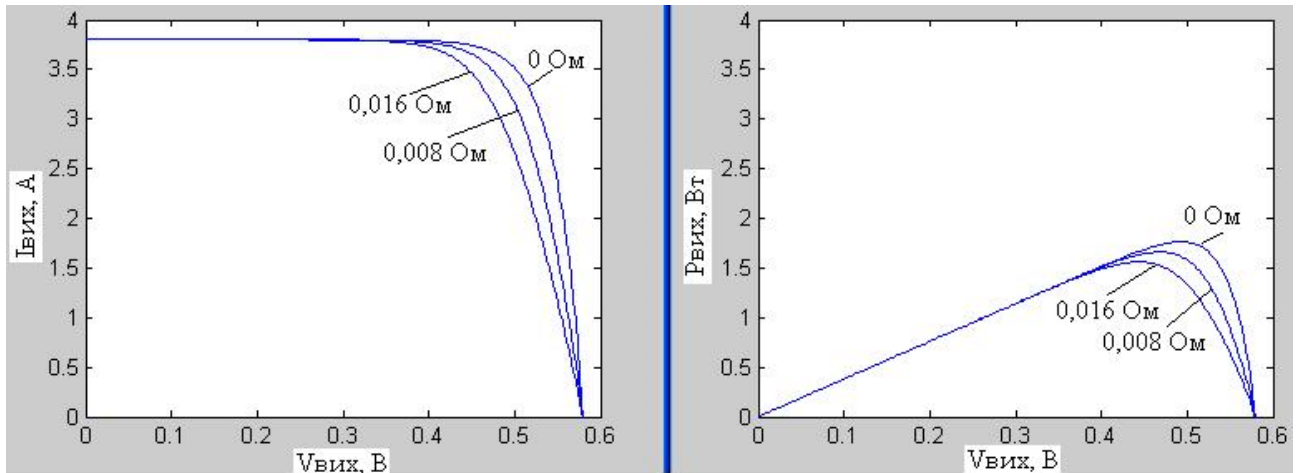


Рисунок 3.14 – ВАХ і ВВХ СЕ при різних значеннях R_s

3.9 Аналіз отриманих результатів

На базі фотоелектричної батареї фірми «Квазар» (рис. 3.15) зі зміною і доопрацюванням її внутрішньої схеми був зібраний лабораторний стенд із застосуванням аналого-цифрових приладів для вимірювання освітленості – люксметр, струму і напруги – мультиметр, і також батарея опорів в якості навантаження. Принципова схема представлена нижче на рис. 3.16



Рисунок 3.15 Сонячна батарея

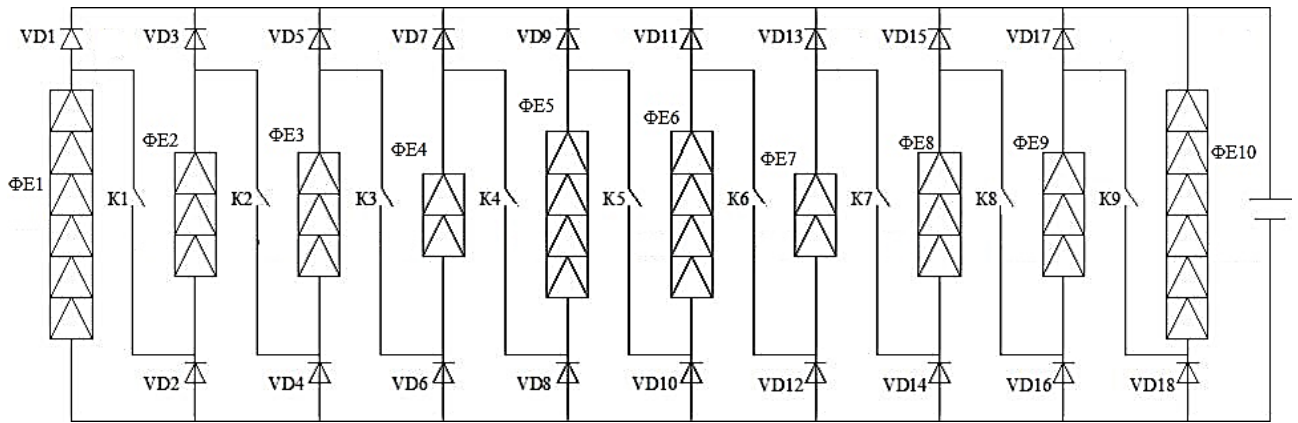


Рисунок 3.16 – Схема з'єднання ФЭП

Таблиця 3.1- Експериментальні дані ФЭП при освітленості $E = 2\ 000$ лк

№ п / п	6 груп по 6 послідовно включених елементів		4 групи по 9 послідовно включених елементів	
	I, A	U, B	I, A	U, B
1	0,18	0	0,26	0
2	0,179	0,16	0,259	0,28
3	0,176	0,3	0,257	0,51
4	0,173	0,44	0,255	0,74
5	0,171	0,58	0,25	0,97
6	0,169	0,72	0,247	1,2
7	0,167	0,86	0,244	1,43
8	0,166	1	0,24	1,66
9	0,165	1,14	0,238	1,89
10	0,164	1,28	0,235	2,12
11	0,163	1,42	0,233	2,35
12	0,162	1,56	0,232	2,58
13	0,161	1,7	0,23	2,81
14	0,16	1,84	0,229	3,04
15	0,159	1,98	0,22	3,27
16	0,158	2,12	0,2	3,5
17	0,15	2,26	0,17	3,73

За отриманими результатами занесеними в таблицю 3.1 побудуємо залежності струму від напруги при різних групах з'єднання фотоелектричних елементів (рис.3.17)

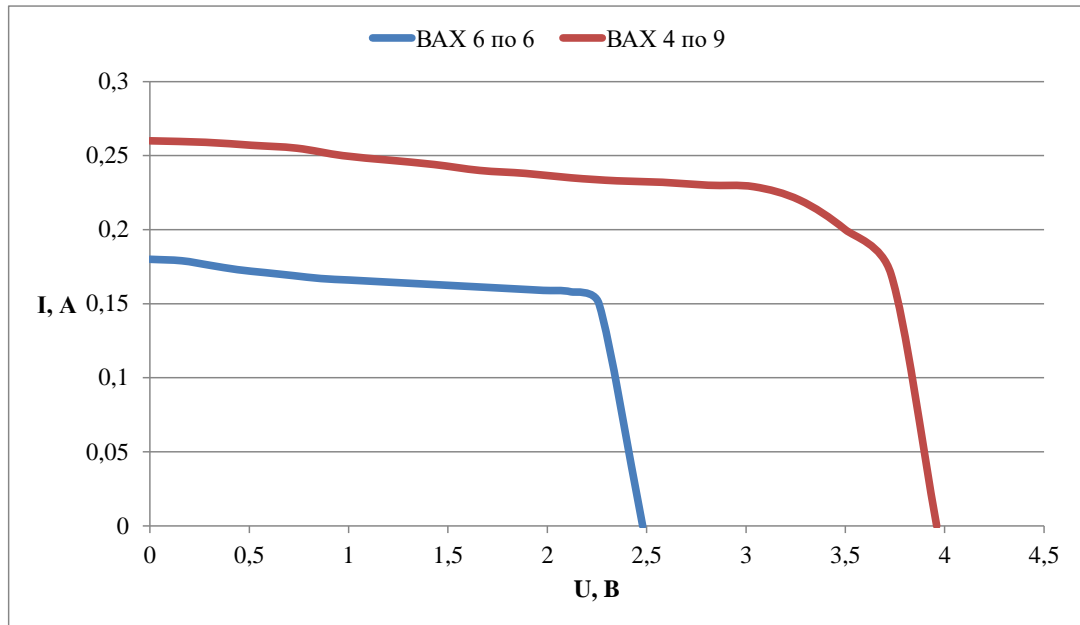


Рисунок 3.17 – Вольт-амперна характеристика при освітленості
 $E = 2\ 000\ лк$

Далі в таблиці 3.2 наведено дані, отримані при освітленості $E = 2\ 000\ лк$

Таблиця 3.2 – Експериментальні дані ФЕП при освітленості $E=3\ 000\ лк$

№ п / п	6 груп по 6 послідовно включених елементів		4 групи по 9 послідовно включених елементів	
	I, A	U, B	I, A	U, B
1	0,2	0	0,29	0
2	0,197	0,16	0,289	0,16
3	0,192	0,3	0,28	2,4
4	0,189	0,44	0,275	2,54
5	0,187	0,58	0,272	2,68

Продовження таблиці 3.2

6	0,185	0,72	0,27	3
7	0,182	0,86	0,269	3,2
8	0,18	1	0,267	3,3
9	0,178	1,14	0,264	3,6
10	0,176	1,28	0,26	3,8
11	0,174	1,42	0,252	3,9
12	0,172	1,56	0,2	4,1
13	0,17	1,7	0,19	4,15
14	0,168	1,84	0,17	4,2
15	0,166	1,98	0,12	4,3
16	0,164	2,12	0,09	4,35
17	0,162	2,26	0,05	4,4
18	0,16	2,4	0	4,5
19	0,153	2,54		
20	0,11	2,68		
21	0	2,82		

За отриманими результатами занесених в таблиці 3.2 побудовано залежності струму від напруги при різних групах з'єднання фотоелектричних елементів (рис.3.18).

В результаті проведених дослідів із запропонованим варіантом підключення фотоелектричних елементів підтверджена працездатність розробленої схеми. Дійсно при зміні схеми з'єднання відповідно до рис. 3.16 можна змінювати вихідну напругу, що дозволить експлуатувати фотоелектричні батареї у пору дня, коли освітленість природно низька.

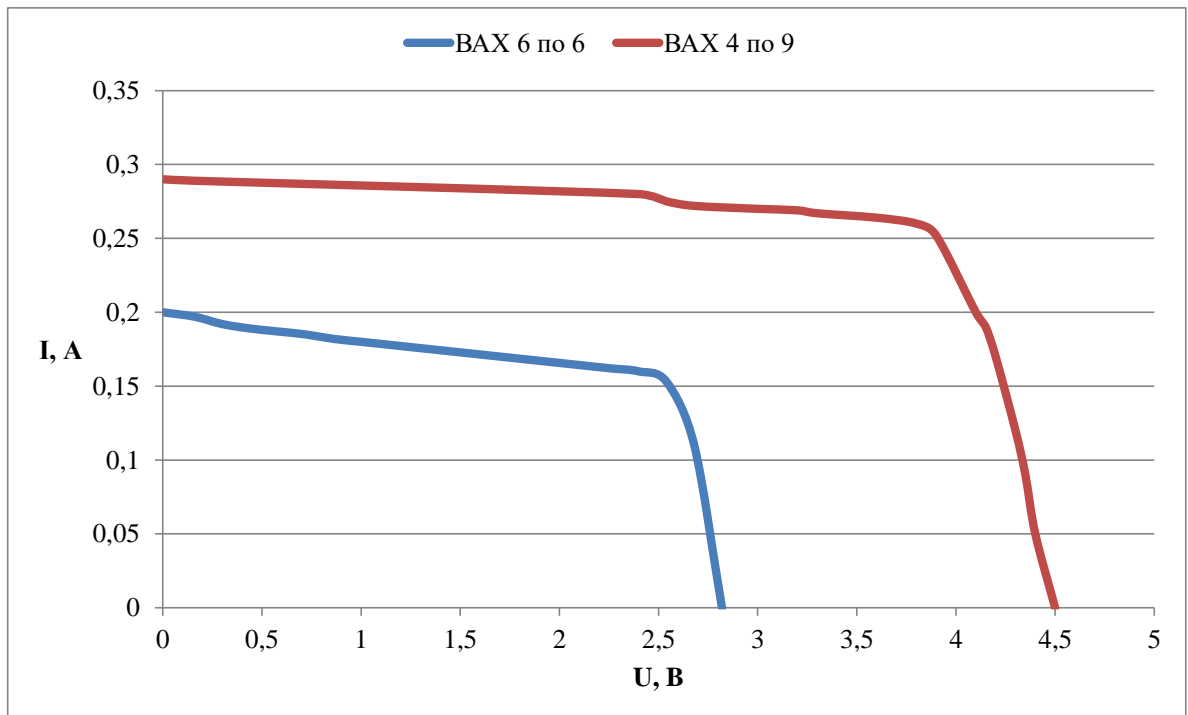


Рисунок 3.18 – Вольт-амперна характеристика при освітленості
 $E=3\ 000$ лк

3.10 Висновок до розділу

1. В розділі представлено детальний розрахунок та проектування фотоелектричної батареї. Для прикладу наведено розрахунок для навантаження постійного струму на 12 В при струмі навантаження 1 А.
2. Удосконалена ідеалізована модель сонячного елемента, яка використовується при аналізі роботи фотоелектричних елементів і батарей, а також використана в проведених розрахунках.
3. Проаналізовано профіль освітленості, тобто випромінювання, яке надходить на сонячну батарею і є функцією часу протягом світлого часу дня від сходу до заходу, а також залежить від кута між напрямком на Сонце і площиною розташування фотоелектричної батареї.
4. Визначено необхідну ємність і проведено вибір акумуляторної батареї.

5. Проведено розрахунок ефективного значення щільності потоку сонячного випромінювання та визначено фактори, які впливають на вихідну потужність фотоелектричних елементів.
6. Досліджено послідовне і паралельне з'єднання елементів фотоелектричної батареї. В результаті отримано залежності струму від напруги при різних групах з'єднання фотоелектричних елементів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання

Загальні вимоги безпеки до конструкції виробничого обладнання встановлені ДНАОП.

Безпека виробничого обладнання забезпечується [13]:

- при проектуванні - дотриманням принципів технологічності і ергономічності конструкції, застосуванням раціональних кінематичних схем, принципу безперервності процесу, дистанційного або автоматичного управління, забезпеченням запобіжними та захисними системами;
- при виготовленні - застосуванням сучасних технологій машинобудування, дотриманням передбачених допусків та посадок;
- при збірці та монтажі - точним дотриманням технології;
- при експлуатації - своєчасним обслуговуванням та профілактичними оглядами, дотриманням експлуатації.

Виробниче обладнання має бути пожежо- і вибухобезпечним. Воно не повинно створювати небезпеки в результаті дії вологості, сонячної радіації, механічних коливань, високих і низьких тисків і температур, агресивних речовин і мікроорганізмів.

Важливою умовою безпечної експлуатації обладнання є дотримання вимог санітарних норм і правил, галузевих стандартів і правил техніки безпеки щодо розмірів виробничих приміщень, галерей і тунелів, мінімальної висоти до низу виступаючих будівельних конструкцій, ширини проходів.

Рухомі частини обладнання, що є джерелом небезпеки, повинні бути огорожені, за виключенням частин, огороження яких не допускається за їх функціональним призначенням. У цих випадках передбачається сигналізація, що попереджує про пуск машин в роботу, засоби зупинки і відключення джерел

енергії. При наявності машин значної довжини (наприклад, транспортерів) засоби зупинки повинні розміщуватись не рідше як через кожні 10 м їх довжини.

Елементи конструкцій виробничого обладнання не повинні мати гострих кутів, кромок і поверхонь з нерівностями, що становлять собою джерело небезпеки, якщо їх наявність не визначається функціональним призначенням обладнання.

Конструкція обладнання повинна виключати можливість випадкового дотику працюючих до гарячих і переохолоджених частин. Виділення і поглинання обладнанням тепла, а також виділення їм вологи у виробничих приміщеннях не повинно перевищувати гранично допустимі! рівні (концентрації) в межах робочої зони.

4.2 Причини електротравм, напруга кроку

Як і при інших видах травм, при електротравмах виділяють технічні, організаційно-технічні, організаційні і організаційно-соціальні їх причини [13].

До технічних причин належать: недосконалість конструкції електроустановки і засобів захисту, допущені недоліки при виготовленні, монтажі і ремонті електроустановки.

До основних організаційних причин електротравм належать:

- відсутність (непризначення наказом) на підприємстві особи, відповідальної за електрогосподарство або невідповідність кваліфікації цієї особи чинним вимогам;
- недостатня укомплектованість електротехнічної служби працівниками відповідної кваліфікації;
- відсутність на підприємстві посадових інструкцій для електротехнічного персоналу та інструкцій із безпечного обслуговування та експлуатації електроустановок;
- недостатня підготовленість персоналу з питань електробезпеки,

несвоєчасна перевірка знань, невідповідність групи з електробезпеки персоналу характеру робіт, що виконуються;

- недотримання вимог щодо безпечного виконання робіт в електроустановках за нарядами-допусками, розпорядженнями та в порядку поточної експлуатації;

- неефективний нагляд, відомчий і громадський контроль за дотриманням вимог безпеки при виконанні робіт в електроустановках та їх експлуатації.

До основних організаційно-соціальних причин електротравм належать: змушене виконання не за спеціальністю електробезпечних робіт; негативне ставлення до виконуваної роботи, обумовлене соціальними чинниками; залучення працівників до понадурочних робіт; порушення виробничої дисципліни; залучення до роботи осіб віком до 18 років.

При переміщенні людини в зоні розтікання струму в землі її ноги будуть торкатися ділянок землі з різними потенціалами, а на людину буде діяти напруга, яка визначається різницею цих потенціалів і відома під назвою *напруга кроку* - різниця потенціалів між двома точками на поверхні землі в зоні розтікання струму, які знаходяться на відстані кроку (0,8 м) одна від одної. З наближенням до місця замикання на землю величина напруги кроку буде зростати, і вона може досягти небезпечних для людини значень вже при напрузі електроустановок 0.4 кВ, а в сиру погоду та за зволоженого ґрунту і при меншій напрузі. Тому Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів при наявності замикання на землю забороняють наближатися до місця замикання ближче 8 м поза приміщенням і 4 м в приміщенні без застосування засобів захисту - діелектричні боти, галоші, суха дошка, сухе гумове взуття тощо.

У цілому, заходи захисту людини від дії напруги кроку зводяться до розірвання мережі струму через людину по петлі "нога-нога", або різкого збільшення опору в цій петлі за рахунок використання різних підручних засобів. За необхідності невідкладного входу в зону небезпечних напруг кроку

для надання допомоги потерпілим і т.ін. і відсутності під рукою засобів захисту, доцільно переміщуватися в цій зоні обережно, пересуваючи ступні по землі так, щоб вони постійно торкались одна другої.

4.3 Запобігання виникненню та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного походження на об'єктах електроенергетики

Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій — це підготовка та реалізація комплексу правових, соціально-економічних, політичних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та інших заходів, спрямованих на регулювання безпеки, проведення оцінки рівнів ризику, завчасне реагування на загрозу виникнення надзвичайної ситуації на основі даних моніторингу (спостережень), експертизи, досліджень та прогнозів щодо можливого перебігу подій з метою недопущення їх переростання у надзвичайну ситуацію або пом'якшення її можливих наслідків [14].

Зазначені функції запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного та природного характеру в нашій країні виконує Єдина державна система запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного і природного характеру, затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 3 серпня 1998 р. № 1198.

Єдина державна система запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного і природного характеру (ЄДСЗР) включає в себе центральні та місцеві органи виконавчої влади, виконавчі органи рад, державні підприємства, установи та організації з відповідними силами і засобами, які здійснюють нагляд за забезпеченням техногенної та природної безпеки, організують проведення роботи із запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного та природного походження і реагування у разі їх виникнення з метою захисту населення і довкілля, зменшення матеріальних втрат.

Основною метою створення ЄДСЗР є забезпечення реалізації державної політики у сфері запобігання і реагування на надзвичайні ситуації, забезпечення цивільного захисту населення.

Завданнями ЄДСЗР є:

- розроблення нормативно-правових актів, а також норм, правил та стандартів з питань запобігання надзвичайним ситуаціям та забезпечення захисту населення і територій від їх наслідків;
- забезпечення готовності центральних та місцевих органів виконавчої влади, виконавчих органів рад, підпорядкованих їм сил і засобів до дій, спрямованих на запобігання і реагування на надзвичайні ситуації;
- забезпечення реалізації заходів щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій;
- навчання населення щодо поведінки та дій у разі виникнення надзвичайної ситуації;
- виконання цільових і науково-технічних програм, спрямованих на запобігання надзвичайним ситуаціям, забезпечення сталого функціонування підприємств, установ та організацій, зменшення можливих матеріальних втрат;
- збирання та аналітичне опрацювання інформації про надзвичайні ситуації, видання інформаційних матеріалів з питань захисту населення і територій від наслідків надзвичайних ситуацій;
- прогнозування і оцінка соціально-економічних наслідків надзвичайних ситуацій, визначення на основі прогнозу потреби в силах, засобах, матеріальних та фінансових ресурсах;
- створення, раціональне збереження і використання резерву матеріальних та фінансових ресурсів, необхідних для запобігання і реагування на надзвичайні ситуації;
- проведення державної експертизи, забезпечення нагляду за дотриманням вимог щодо захисту населення і територій від

- надзвичайних ситуацій (у межах повноважень центральних та місцевих органів виконавчої влади);
- оповіщення населення про загрозу та виникнення надзвичайних ситуацій, своєчасне та достовірне його інформування про фактичну обстановку і вжиті заходи;
 - захист населення у разі виникнення надзвичайних ситуацій;
 - проведення рятувальних та інших невідкладних робіт щодо ліквідації надзвичайних ситуацій, організація життєзабезпечення постраждалого населення;
 - пом'якшення можливих наслідків надзвичайних ситуацій у разі їх виникнення;
 - здійснення заходів щодо соціального захисту постраждалого населення, проведення гуманітарних акцій;
 - реалізація визначених законодавством прав у сфері захисту населення від наслідків надзвичайних ситуацій, в тому числі осіб (чи їх сімей), що брали безпосередню участь у ліквідації цих ситуацій;
 - участь у міжнародному співробітництві у сфері цивільного захисту населення

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В роботі розглянуті фотоелектричні елементи, їх будову і фізичний принцип роботи фотоелементів і фотоелектричних модулів (батареї).

2. Представлені моделі, що застосовуються для імітування фотоелектричних батарей, розглянуті їхні переваги і недоліки. Досліджено методи та засоби вивчення напівпровідникових фотоелектричних батарей малої потужності з урахуванням впливу природних і апаратних факторів.

3. Показано корисність і доцільність моделювання фотоелектричних батарей для підвищення ефективності їх застосування. Визначено алгоритм моделювання фотоелектричних батарей з різних напівпровідникових матеріалів.

4. В результаті проведених дослідів із запропонованим варіантом підключення фотоелектричних елементів була підтверджена працездатність розробленої схеми.

5. У свою чергу після ряду виконаних досліджень рекомендуємо застосування розробленої схеми підключення фотоелектричних елементів як одного з безлічі варіантів вирішення проблеми щодо підвищення продуктивності як фотоелектричних батарей індивідуального користування, так і сонячних електростанцій в цілому.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Величко Ю.М. Підвищення ефективності сонячної фотоелектричної енергоустановки// Ю.М.Величко, О.І.Демчук, В.Б.Пусь, А.Г.Стецюк, С.В.Слободян /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей X міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 24–25 листоп. 2021.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: 2021. Т. 2. – 17-18.
2. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. — Л.: Наука, 1989. — 310 с.
3. Ж. Симон, Ж.-Ж. Андре - Молекулярные полупроводники фотоэлектрические свойства и солнечные элементы – «Мир» Москва 1988.
4. A.P.Gorban, V.P.Kostylev, V.N.Borshev, A.M.Listratenko. State and prospects of a development of silicon photoconverters and batteries for the space use // Telecommunications and Radio Engineering.-2001. - V.55, No 9. - P.94-100.
5. Studies on new hybrid system of wind-solar-diesel power/ Shimuzu Yukimaru, Morisawa Saburo, Mizuno Eiji, Hori Tokamasa, Ishida Muneaki // Wind Energy; Technol, and Implem.: Proc. Eur. Wind Energy Conf., Amsterdam, Oct. 14-18, 1991: EWEC91. Pt I. - Amsterdam etc., 1991, p. 500-504.
6. Lamnatou, D. Chemisana Photovoltaic/thermal (PVT) systems: A review with emphasis on environmental issues. Renewable Energy 105 (2016), 270-287.
7. E. Bellos, C. Tzivanidis, Yearly performance of a hybrid PV operating with nanofluid, Renew. Energy 113 (2017) 867—884.
8. Козлов А. В. Автореферат: Контроль влияния параметров атмосферы на энергетические характеристики кремниевой солнечной батареи. Специальность 05.11.13 Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. Томск 2008.
9. Фролкова Н. О. Автореферат: Моделирование солнечных батарей на основе различных полупроводников. Специальность 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах. Москва 2011.

10. Коваль В.П. Збільшення ефективності використання сонячних панелей. / Я.О. Філюк, С.І.Герєга // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.

11. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасенчко, К. М. Козак // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10.

12. Філюк Я.О. Енергоощадні освітлювальні установки з автономним живленням/ В.А. Андрійчук, В.П.Коваль// Матеріали науково-практичного семінару «Міжнародний інвестиційний форум – виставка з енергоефективності та енергоощадності 2015». Тернопіль. 8.10.2015 – С. 103-105.

13. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.

14. Стеблюк М.І. Цивільна оборона та цивільний захист: Підручник. – 2-ге вид., перероб. Затверджено МОН / М.І. Стеблюк.– К., 2010. – 487 с.