

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації,
електроінженерії та радіоелектроніки

(повне найменування інституту, назва факультету)

кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

О.Ю. Колларов

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 2021 р.

Дипломна робота

магістра

(освітній ступінь)

на тему Впровадження автономної установки електроживлення з
фотоелектричними елементами

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕЛКЗМ-19

(шифр групи)

напряму підготовки (спеціальності) 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Поздняков В.О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник Тімошенко С. М., д.т.н, проф.

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

(підпис)

Рецензент:

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

(підпис)

Нормоконтроль:

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

Любименко О. М.

Студент

(підпис)

(підпис)

(дата)

(дата)

Покровськ – 2021 р.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації,
електроінженерії та радіоелектроніки

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

(Колларов О. Ю.)

« ____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Позднякову Володимирі Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Впровадження автономної установки
електроживлення з фотоелектричними елементами

керівник роботи Тімошенко С. М., д.т.н, проф.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ №

2. Строк подання студентом роботи 05 травня 2021 року

3. Вихідні дані до роботи: Автономна установка електрожив-
лення складається із навантаження у вигляді трьох вентиляторів з
приводом змінного струму потужністю кожен по 3 кВт, час роботи
вентиляторів – цілодобово, блока акумуляторних батарей, регуляторів та
джерела живлення на базі фотоелектричних елементів сумарною
потужністю 216 кВт. Інші параметри обрати довільно.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які
потрібно розробити) 1. Огляд загальних відомостей про сонячну енергію та
принципів виробки сонячної енергії за допомогою фотоелектричних
модулів.

2. Облаштування і розрахунок автономної установки з фотоелектричними
модулями.

3. Визначення можливості відстеження точки максимальної потужності.

4. Моделювання роботи фотоелектричної системи.

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

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Біла Н. С.		
Розділи 1, 2	Колларов О. Ю.		
Нормоконтроль	Любименко О. М.		

7. Дата видачі завдання 15 лютого 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд загальних відомостей про сонячну енергію.	15.02.2021 – 28.02.2021	
2.	Огляд загальних принципів виробки сонячної енергії за допомогою фотоелектричних модулів.	01.03.2021 – 09.03.2021	
3.	Огляд систем електропостачання відповідальних споживачів енергоємних виробництв.	10.03.2021 – 19.03.2021	
4.	Облаштування і розрахунок автономної установки з фотоелектричними модулями.	20.03.2021 – 31.03.2021	
5.	Визначення можливості відстеження точки максимальної потужності.	01.04.2021 – 09.04.2021	
6.	Моделювання роботи фотоелектричної системи.	10.04.2021 – 19.04.2021	
7.	Огляд питань охорони праці.	20.04.2021 – 30.04.2021	

Студент

Поздняков В.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Тімошенко С.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Поздняков В.О. Впровадження автономної установки електроживлення з фотоелектричними елементами / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі визначено основи виробки електричної енергії фотоелектричними модулями – наведено загальні відомості про сонячну енергію та загальний принцип виробки сонячної енергії за допомогою фотоелектричних модулів.

У другому розділі було оглянуто можливість створення автономної установки електроживлення з фотоелектричними елементами – здійснено огляд систем електропостачання відповідальних споживачів енергоємних виробництв та виконано розрахунок автономної установки з фотоелектричними модулями.

У третьому розділі здійснено наведено основи для моделювання фотоелектричних систем з можливістю відстеження точки максимальної потужності.

У четвертому розділі здійснено моделювання роботи фотоелектричної системи.

Ключові слова: сонячна енергія, фотоелектричний модуль, напівпровідник, автономна установка, електропостачання, точка максимальної потужності, моделювання

SUMMARY

Pozdnyakov V.O. Introduction of an autonomous power supply unit with photovoltaic cells / Graduation qualifying work for obtaining an educational level "master" in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Pokrovsk, 2021.

Thesis consists of an introduction, the main part, which includes four sections, conclusions, list of references and appendices.

The first section defines the basics of electricity generation by photovoltaic modules - provides general information about solar energy and the general principle of solar energy generation using photovoltaic modules.

In the second section, the possibility of creating an autonomous power plant with photovoltaic cells was reviewed - a review of power supply systems of responsible consumers of energy-intensive industries and the calculation of an autonomous installation with photovoltaic modules.

The third section presents the basics for modeling photovoltaic systems with the ability to track the point of maximum power.

In the fourth section, the simulation of the photovoltaic system is performed.

Keywords: solar energy, photovoltaic module, semiconductor, autonomous installation, power supply, maximum power point, modeling

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1 ОСНОВИ ВИРОБКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ МОДУЛЯМИ	10
1.1 Загальні відомості про сонячну енергію	10
1.2 Загальний принцип виробки сонячної енергії за допомогою фотоелектричних модулів	17
1.3 Теоретичне визначення струмів у напівпровідниках	23
2 СТВОРЕННЯ АВТОНОМНОЇ УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ	27
2.1 Огляд систем електропостачання відповідальних споживачів енергоємних виробництв	27
2.2 Розрахунок автономної установки з фотоелектричними модулями	29
3 ОСНОВИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З МОЖЛИВІСТЮ ВІДСТЕЖЕННЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ	41
4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ	57
ВИСНОВКИ	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	66
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	71

ДОДАТОК Б. ОГЛЯД ПИТАНЬ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ	79
ДОДАТОК В. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА ДО РОБОТИ	88

ВСТУП

Зменшення запасів викопного палива та загроза глобального потепління викликає у більшому ступені широке впровадження альтернативних засобів і методів виробки енергії.

Перетворення енергії сонячного випромінювання у електричну енергію може здійснюватися двома способами: по-перше, перетворення світлової енергії у теплову, а потім – у електричну (фототермічний спосіб), по-друге, пряме перетворення світлової енергії у електричну (фотоелектричний спосіб).

За всіх інших умов, основною є умова перетворення сонячної енергії у електричну з максимально низькою вартістю (собівартістю).

Альтернативою використання сонячних батарей можуть бути сонячні концентратори з прямим перетворенням сонячної енергії в теплову енергію води.

Сонячна енергія є досить гарним підґрунтям для вирішення енергетичних проблем у регіонах країни.

Перевагами застосування «сонячних технологій» є їхня екологічність – при їх роботі не відбувається забруднення навколишнього середовища. Параметри «сонячної енергії» залежать від стану атмосфери, часу доби і пори року.

Недоліками фотоелектричних систем є іноді значна кількість ступеней перетворення енергії, що малює перспективи для підвищення її ефективності з одночасним підвищенням надійності системи. До того ж, кожна така система вимагає обов'язкового застосування схем управління ними, які виконують ряд функцій: формування вихідної напруги з низьким коефіцієнтом гармонік, сервісні та керуючі функції, захист від перенапруг і перерозряду (у разі використання акумуляторних блоків), видача поточної інформації про стан системи. Сучасні системи керування

практично завжди містять інвертори управління, робота яких заснована на силових перетворювачах, та містять керуючий мікропроцесор, який формує задану форму і значення синусоїдної напруги заданої частоти.

Фотоелектричні модулі досить гарно піддаються імітаційному моделюванню, що дозволяє відображати сімейство енергетичних і вольт-амперних характеристик. Однак, необхідно вважати, що розроблені моделі описують реальний фотоелектричний модуль лише з певним ступенем наближеності та з урахуванням прийнятих припущень.

Отримані характеристики дозволяють також визначати відповідність характеристик фотоелектричних модулів, що надаються виробником, та визначати допустимість чи недопустимість отриманих розбіжностей, а також підтвердження адекватності складеної моделі.

1 ОСНОВИ ВИРОБКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ МОДУЛЯМИ

1.1 Загальні відомості про сонячну енергію

Нашому часу притаманна зростаюча потреба у енергії будь-яких видів, глобальне потепління, закінчення викопних джерел енергії та постійне зростання цін на енергоносії. Ці фактори все більше підштовхують людство до широкого використання альтернативних та відновлюваних джерел енергії [1].

Усе більше керівництв прогресивних країн на законодавчому рівні започатковують вимоги до впровадження екологічно чистих та заснованих на відновлювальних та альтернативних технологіях виробництва енергії для майбутнього енергопостачання. Основні позитивні риси відновлюваних джерел – це їх невичерпність, потужність, відновлюваність та чистота [2].

Прогресивні дослідження та технології у цій області пропагують виробництво електроенергії з природних, невичерпних та відновлювальних джерел енергії: сонячна енергія, енергія вітру, гідроенергія, енергія з біомаси, енергія океанічних хвиль, геотермальна енергія, енергія припливів.

Зростання обсягів впровадження та використання відновлюваних джерел є запорукою «чистішої» енергетики майбутнього. На шляху цього зростання можуть виникати певні технічні та організаційні проблеми, що можуть суттєво зменшити темпи впровадження відновлюваних генерацій [3].

Першою з цих перешкод можна назвати надійність виробки визначеної кількості енергії даною системою. Ці показники напряму залежать від кліматичних умов і зміні їх в часі, а, отже, ніколи не бувають постійними. Це положення може призвести до ненадійності

енергоживлення та «програшу» даних технологій традиційним. З іншого боку, може також постати питання якості спродукованої відновлюваними джерелами енергії, яке також залежить від зазначених вище факторів. Зокрема, якість електропостачання визначається рівнем коливань напруги, рівнем зміни частоти та наявністю вищих гармонік струму. Для контролю питань надійності та якості енергопостачання з відновлюваних джерел необхідно мати повну картину процесів, що протікають, та розуміти зміну головних показників роботи системи у залежності від зовнішніх впливів [4].

Сонячна енергія є найроповсюдженішим та найдоступнішим видом енергії на більшій території земної кулі. Загальна кількість сонячної енергії, що потрапляє на земну поверхню складає близько $2 \cdot 10^{20}$ кВт·год/рік, що у тисячі разів більше за усе споживання всіх видів енергії у всьому світі. Місце сонця постійно змінює своє положення протягом дня внаслідок зміни як висоти так і азимуту – рис. 1.1 [5].

Сонячне опромінення – це кількість електромагнітного випромінювання від сонця на одиницю площі, що вимірюється на земній поверхні земної площині, що є перпендикулярною до променів. Це значення включає не лише видимий спектр, а й решту видів випромінювання.

Кількість сонячної енергії, доступної на одиницю площі, відома як опромінення (інсоляція), у середньому щільність потужності сонячної інсоляції складає близько $1,37 \text{ кВт/м}^2$ земної поверхні. Це значення коливається від $1,32$ до $1,41 \text{ кВт/м}^2$. Значення цієї величини від місця до місця різняться у залежності від багатьох факторів, у тому числі від умов проходження сонячного опромінення через атмосферу та кута падіння по відношенню до поверхні землі, залежить від погодних умов та розташування сонця на небосхилі [6].

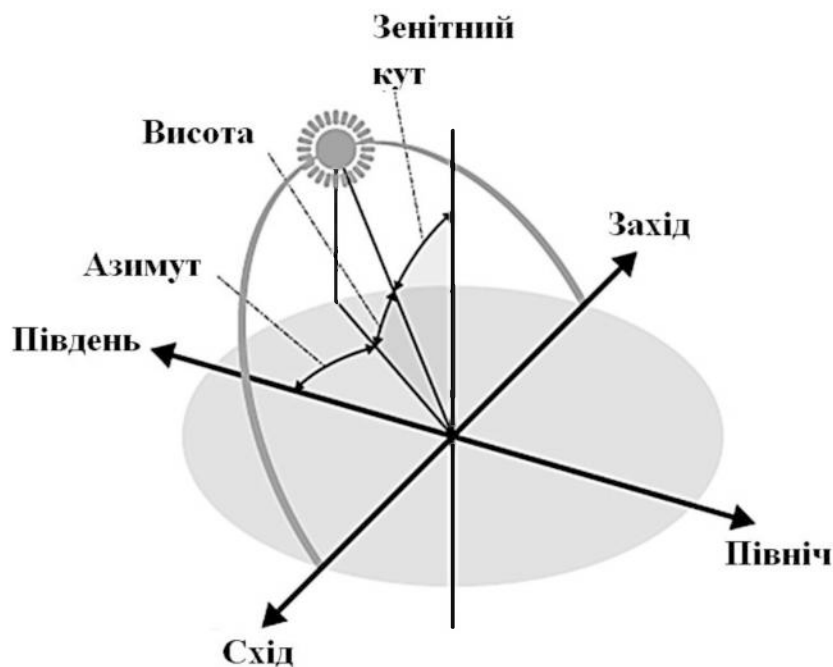


Рисунок 1.1 – Визначення положення Сонця на небосхилі

Сонячна радіація являє собою електромагнітне випромінювання, зосереджене у діапазоні хвиль, довжина яких складає від 0,27 до 3,10 мкм. За статистичними даними, сонячний спектр складається з ультрафіолетових, світлових та інфрачервоних хвиль. Довжина ультрафіолетових хвиль знаходиться у діапазоні від 0,275 до 0,375 мкм (вони є невидимими для неозброєного ока). Світлові хвилі займають діапазон від 0,375 до 0,775 мкм. Інфрачервоні хвилі мають довжину хвиль у діапазоні від 0,775 до 3,0 мкм [7].

На рис. 1.2 показано рівень сонячної інсоляції по всьому світу [8].

Також виділяють поняття «сонячне вікно», яке являє собою ефективну область, через яку протягом року проходить максимальна кількість сонячного світла для визначеного періоду часу. Розмір цього «вікна» використовують для визначення потенційного відсотку затінення при проектуванні фотоелектричних систем. «Сонячне вікно» можна визначити за «Сонячною картою», яка являє собою графічний інструмент для проектування сонцезахисних пристроїв і визначення періоду інсоляції. – рис. 1.3 [9].

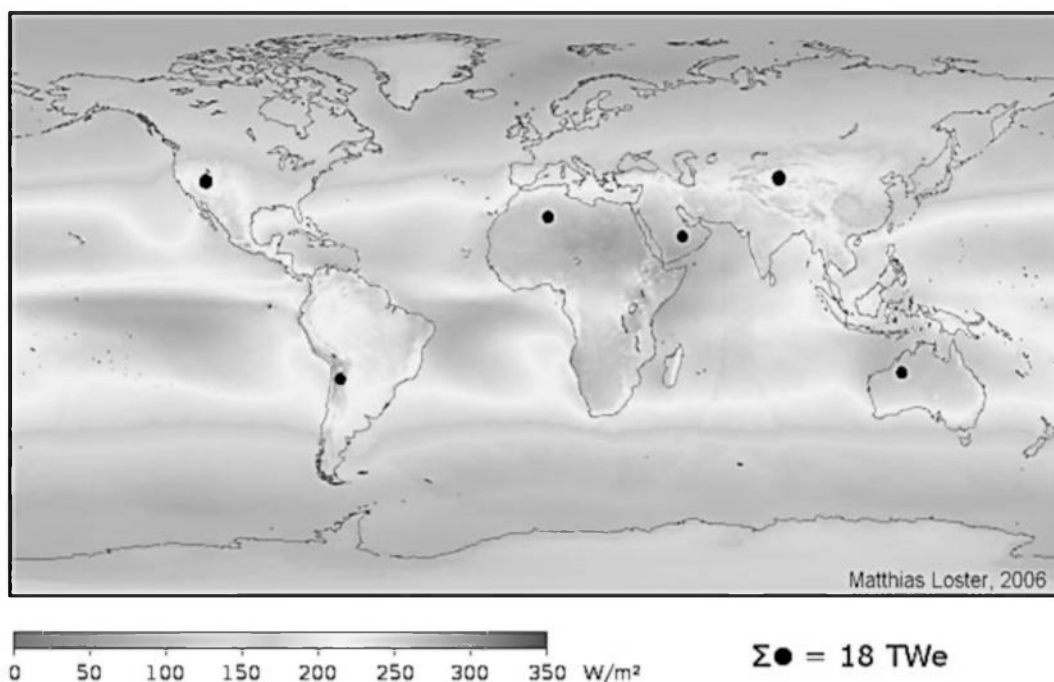
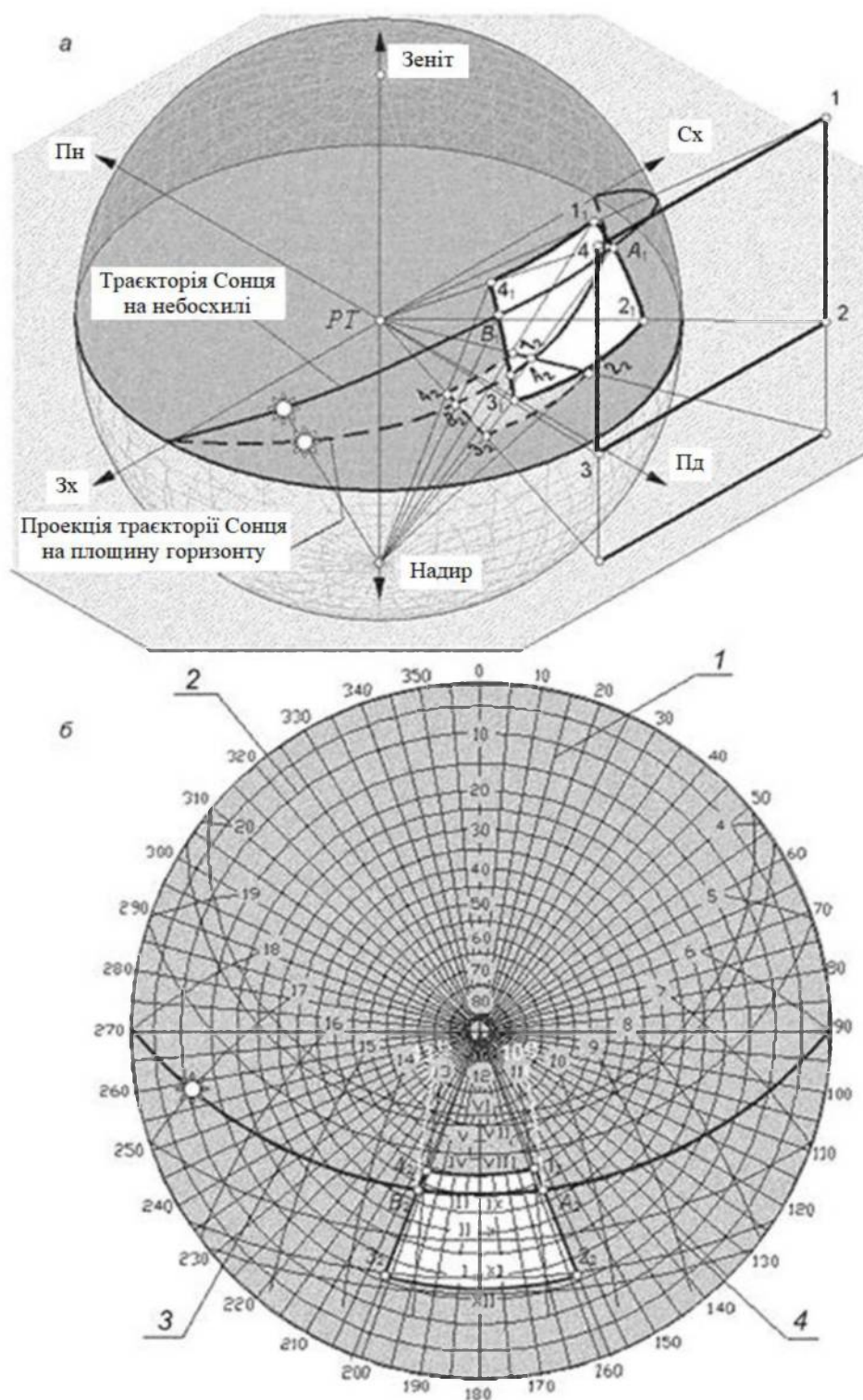


Рисунок 1.2 – Рівень сонячної інсоляції по світу

Сонце випромінює потужність через безперервну смугу або спектр довжин електромагнітних хвиль, при цьому потужність хвиль різної довжини неоднакові: загальна кількість сонячної енергії містить 8% ультрафіолетового випромінювання, 45% видимого випромінювання та 48% інфрачервоного (теплого) випромінювання [9].

Стосовно ультрафіолетового випромінювання можна сказати, що воно суттєво фільтрується у верхніх шарах атмосфери шаром озону. Для роботи фотоелектричних елементів в основному використовують видиме випромінювання при цьому досить важливим є колір, що відбивається на цьому модулі. Інфрачервоне випромінювання дозволяє виробляти електричну енергію з деяких неорганічних матеріалів (наприклад, кристалічного кремнію) – у більшості випадків інфрачервоне випромінювання не досить важливе для виробки електроенергії у порівнянні з видимою частиною спектру [10].



1 – азимутальні лінії (для визначення азимуту Сонця), 2 – концентричні кола – альмукантарати (для визначення висоти Сонця), 3 – траєкторії руху Сонця по небосхилу (для 22 числа кожного місяця), 4 – дуги кіл (сонячні часові лінії)

Рисунок 1.3 – «Сонячна карта» і «Сонячне вікно»: а – будова (сонячного вікна), б – сонячна карта

У результаті руху планети Земля та наявності атмосферних явищ на її поверхні в різних її місцях можна казати про різну величину сонячної інсоляції – погодинну і щоденну. Величина сонячного опромінення має зв'язок з величиною потужності на одиницю площі, у той час як сонячна інсоляція визначає величину променевої енергії на одиницю площі. Сонячну інсоляцію можна визначити шляхом підсумовування сонячного опромінювання за визначений час (наприклад, за добу) – $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ за добу [10].

При проходженні через атмосферу потужність сонячної радіації зменшується через поглинання і розсіювання пилом, аерозолями і молекулами газів; частина падаючої енергії Сонця відбивається назад у Космос. Відсоток відбитої сонячної енергії залежить від типу поверхні, на яку потрапляє випромінювання: для сухого чорнозему ця частка дорівнює 0,15, для зораного поля – 0,30, для снігу – 0,85, для водної поверхні – 0,65 у залежності від кута падіння сонячних променів. До того ж щільність потоку неоднакова на різних широтах Землі, і в різні пори року та період доби [11].

Для облаштування фотоелектричної станції важливим є поняття «середньодобового значення сонячної радіації», яка визначається на основі статистичних даних про сонячну радіацію для кожного місяця протягом тривалого періоду (десятки років). Ці дані є досить корисними для прогнозування довгострокових показників так і для визначення економічної доцільності облаштування фотоелектричних систем. На додаток до зазначених понять важливим показником є кількість сонячних годин з максимальним випромінюванням за день для даного місяця [12].

Світло, що надходить від сонця, перш ніж воно потрапляє на землю втрачає, приблизно, 30-40% через розсіювання атмосферними частинками, частками пилу, поглинання атмосферними газами [12].

Прийнято розглядати «пряме (променеве) випромінювання» – пряме сонячне випромінювання та «розсіяне випромінювання» – випромінювання з інших джерел та місць (глобальна) радіація.

Сонячна енергія є поновлюваним джерелом енергії, параметри якого мають колосальні розміри. Однак технологія його «вловлювання» має свої недоліки, в основному через те, що сонячна інсоляція та атмосферні умови значно коливаються у залежності від місця на земній поверхні [13].

Перевагами використання «сонячної» енергії та застосування фотоелектричних систем є [13]:

- значна потужність даного джерела енергії,
- універсальність,
- екологічність,
- не створює шуму,
- відсутність рухомих частин,
- незначні об'єми обслуговування фотоелектричних систем,
- модульність систем, які можуть бути розширені протягом часу,
- у деяких випадках безальтернативність.

Недоліки даної системи [13]:

- на теперішній час, ще не досить висока ефективність перетворення сонячної енергії (від 15 до 20%) у залежності від застосованої технології,
- високі початкові вкладення у систему,
- обмеженість доступності сонячної енергії (Сонце не світить над визначеною територією вночі),
- не ефективність у часи пікового навантаження (вранці і увечері), що вимагає використання коштовних накопичувачів енергії – акумуляторів,
- необхідність відчуження значних територій під сонячні модулі,
- висока залежність від атмосферних умов,
- низька щільність сонячної радіації,
- зміна сонячної потужності впродовж дня та її сезонність,

- економічна доцільність виробництва енергії лише у певних географічних зонах,
- недосконалість існуючих перетворювачів енергії (інверторів), які вимагають додаткового охолодження.

1.2 Загальний принцип виробки сонячної енергії за допомогою фотоелектричних модулів

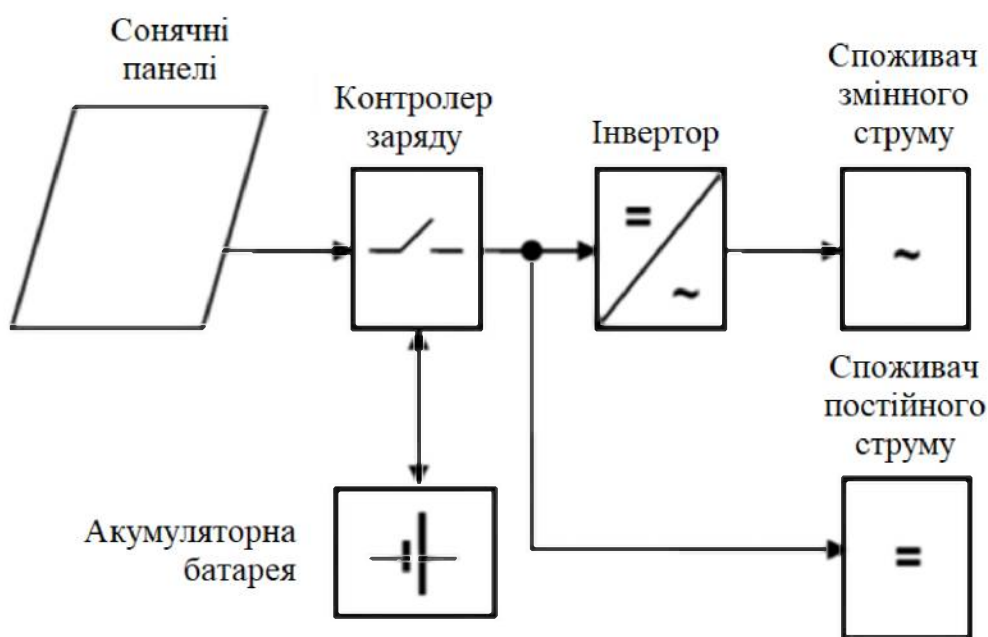
Найпоширенішим з усіх відновлюваних джерел енергії у теперішній час є сонячна енергія. Перетворення даного виду енергії у електричну відбувається шляхом використання фотоелектричного методу – генерації електричної енергії шляхом перетворення сонячного випромінювання у потік електронів у напівпровідниках, в яких здатен проявлятися фотоелектричний ефект [14].

Генерування електричної енергії постійного струму від сонця вимагає застосування спеціальних конструктивних одиниць – «сонячних панелей», які складаються з ряду комірок з напівпровідникового матеріалу. При потраплянні сонячного світла на дані панелі, виникає рух потоку електронів і отримуємо, так званий, фотоелектричний струм. Коли світло на панель не потрапляє, електрична енергія не виробляється. Строк ефективної роботи сучасних фотопанелей коливається від 20 до 30 років, навіть за умови їх встановлення на відкритому просторі [14].

Фотоелектричні модулі складаються зі значної кількості фотоелектричних елементів і можуть бути підключені або паралельно – для збільшення струму, або послідовно – для отримання більш високих значень напруги. Для досягнення високих енергетичних показників сонячної панелі (заданих величин струму і напруги) фотоелектричні елементи у панелі мають мішане з'єднання [15].

На теперішній час, у більшості випадків, впровадження відновлюваних сонячних джерел енергії визначається економічною ефективністю і головний показник тут – строк окупності – як тільки вартість обладнання та монтажу буде покрита, вироблена електрична енергія буде найдешевшою у виробці у порівнянні з традиційними джерелами. Основна стаття витрат буде полягати у необхідності мінімального обслуговування, необхідного для підтримки працездатності сонячних панелей та супутнього обладнання.

Штучна фотоелектрична система безпосередньо перетворює сонячне випромінювання в електричну енергію. Структурну схему фотоелектричної системи представлено на рис. 1.4 [16].



1 – фотоелектричний масив, 2 – контролер, 3 – акумуляторні батареї, 4 – струмовий інвертор, 5 – з'єднувальна мережа

Рисунок 1.4 – Схематичне зображення фотоелектричної системи

Блоки, що її складають мають різне функціональне призначення [14]:

– фотоелектричний масив призначений для безпосереднього перетворення сонячного випромінювання в електричний струм,

- контроллер здійснює функції контролю роботи сонячних панелей та ступінь заряджання-розряджання акумуляторних батарей,
- акумуляторні батареї призначені для зберігання надлишків виробленої електричної енергії,
- струмовий інвертор призначений для перетворення постійного струму у трифазний змінний струм,
- з'єднувальна мережа забезпечує зв'язок між окремими компонентами системи та споживчою мережею.

Кожен фотоелектричний модуль містить матрицю сонячних елементів, з'єднаних послідовно або паралельно, для задоволення потреб кінцевого споживача.

Окремий сонячний елемент – це пристрій, який перетворює фотони сонячних променів у постійний струм та виникнення різниці потенціалів (напруги). У якості цих елементів використовуються напівпровідникові матеріали з особливими властивостями – кремній або германій.

Типовий кремнієвий фотоелектричний елемент являє собою тонку пластинку, що містить тонкий шар кремнію, який або легують фосфором (N-тип), або бором (P-тип). Електричний струм виникає на верхній поверхні комірки, що утворилися, у місці, де ці два матеріали контактують (так званий P-N-перехід) [18].

У разі потрапляння сонячного світла на поверхню напівпровідника, електрон вибивається і притягується до напівпровідникового матеріалу типу N, що призводить до збільшення негативного потенціалу на N-елементі та збільшення позитивного потенціалу P-елементі, генеруючи потік електричної енергії – фотоелектричний струм (рис. 1.5) [19].

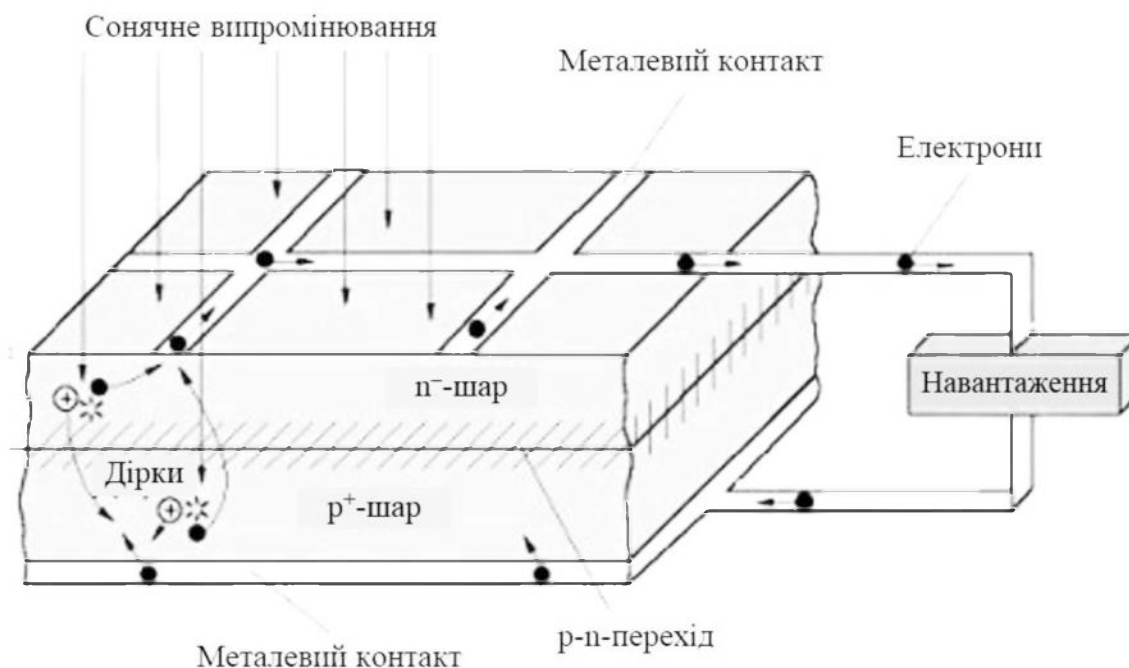


Рисунок 1.5 – Принцип дії кремнієвої сонячної батареї

Величина фотоелектричного струму, що генерується фотомодулем, залежить від його ефективності, площі поверхні та інтенсивності сонячного випромінювання.

Як вже було зазначено вище, сонячні елементи виготовляються з напівпровідникових матеріалів. Для оптимізації характеристик цих елементів необхідно мати максимальні відомості про властивості матеріалу, оскільки існує пряма залежність між цими знаннями та можливостями виробки електричної енергії.

Напівпровідники – це клас матеріалів, які мають властивості, що знаходяться між властивостями провідними та ізоляційними матеріалами. До того ж, на їх електричні характеристики можна здійснювати вплив шляхом сонячного опромінення.

Напівпровідники можна класифікувати за їх хімічною структурою у елементарній, складній або молекулярній формі [20].

Усі напівпровідники мають спільні та відмінні властивості, що визначають їх фотоелектричну ефективність.

Атомарна структура матеріалів має визначальний вплив на ефективність їх роботи – існує три атомарні устрої [21]:

- кристалічний, при ідеальному упорядковані атомів у масиві (рис. 1.6а),
- аморфні, при випадковому порядку атомів у масиві (рис. 1.6б),
- полікристалічний, при наявності кристалографічних зерен, з'єднаних між собою (рис. 1.6в).

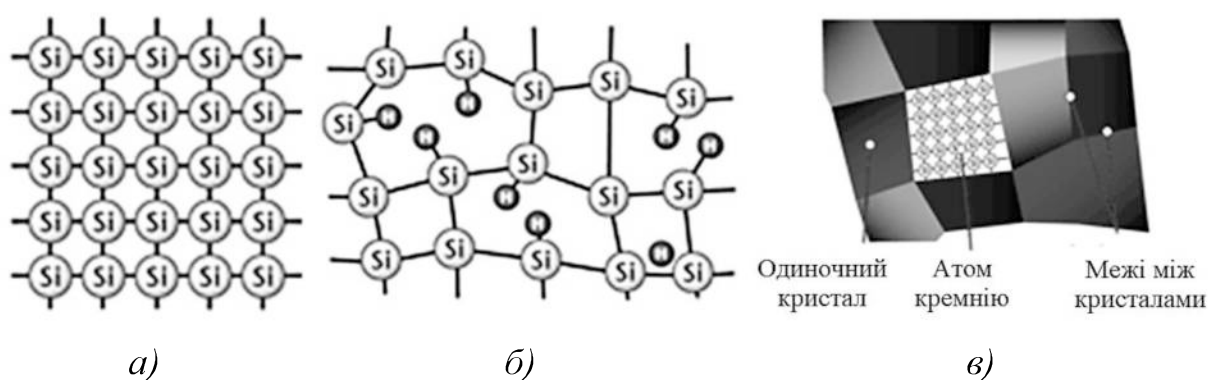


Рисунок 1.6 – Структури однокристалного (а), аморфного (б) та полікристалічного (в) кремнію

Сонячні фотоелементи, що виготовлено з кристалів, мають більшу ефективність у порівнянні з аморфними матеріалами. Напівпровідник має заповнену електронами валентну зону, а також порожню зону провідності. Валентні електрони можуть ділитися сусідніми атомами і не ділитися зв'язаними атомами, що мають кожен своє визначене місце і не здатні проводити електричний струм. Для того, щоб зазначені матеріали почали проводити електричний струм, необхідно звільнити валентні електрони. Це можна зробити шляхом виконання роботи, достатньої для розриву атомарних зв'язків. Роботу цю можна здійснити шляхом нагрівання або освітлення обраного матеріалу зовнішнім випромінюванням та/або додаванням до матеріалу напівпровідника визначених домішок. При розірванні наведеного вище зв'язку, утворюється «вільна дірка» і «вільний

електрон», що дозволяють напівпровіднику проводити електричний струм [22].

Мінімальна енергія, яку необхідно використати для розриву зв'язку та для утворення зазначеної електронної пари, називається енергетичним бар'єром. Енергетичний бар'єр відокремлює «вільні дірки» від «вільних електронів» (рис. 1.7) [23].

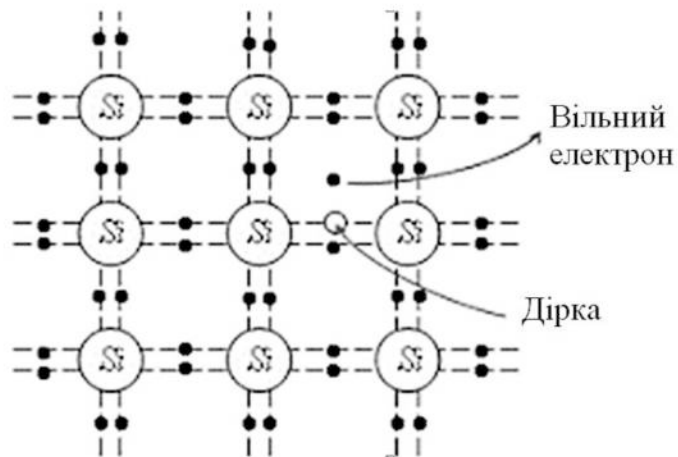


Рисунок 1.7 – Утворення пари «вільна дірка» – «вільний електрон»

Електрони, що знаходяться у зоні провідності, мають найнижчий енергетичний стан (с-зона), а дірки займають місця у верхній частині валентної зони (v-зона), утворюючи енергетичний бар'єр (рис. 1.8) [24].

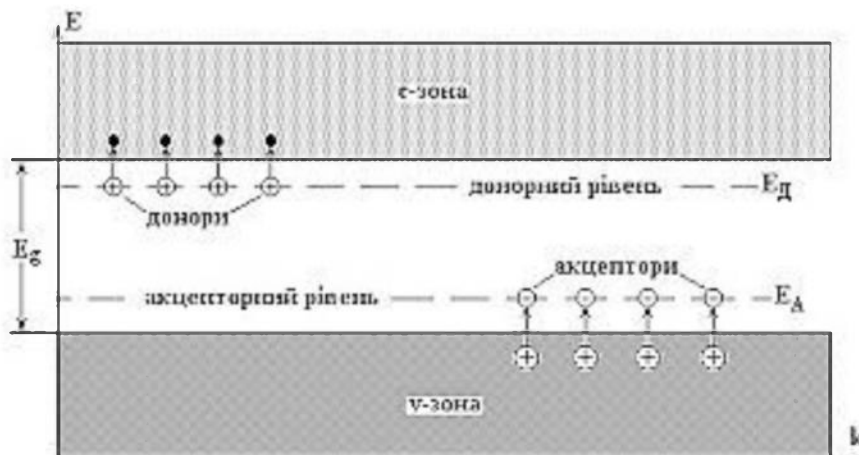


Рисунок 1.8 – Енергетичний бар'єр (E_g)

Сонячна випромінювання потрапляє на напівпровідниковий елемент з визначеною шириною енергетичного бар'єру, величина якого визначає його ККД у визначеній частині сонячного спектра. Фотони, що мають енергію нижчу за величину цього бар'єру не впливають на виробку енергії цим елементом і матеріал якого для цих променів є оптично-прозорим. У разі, коли напівпровідники мають кілька шарів, то промені, пройшовши через перший шар і потрапляючи на другий, який має величину енергетичного бар'єру, меншу у порівнянні з першим шаром. Це дозволяє отримати більш високе значення ККД такого складеного елемента, ніж для кожного елемента окремо [25].

1.3 Теоретичне визначення струмів у напівпровідниках

Для покращення характеристик напівпровідників до них додають різноманітні домішки. Ці домішки визначає те, які властивості набуде напівпровідник: n- або p-тип (збільшено або концентрацію «електронів» або концентрацію «дірок» у матеріалі відповідно). Для отримання напівпровідників n-типу до атомів кремнію додають фосфор (P) або миш'як (As). Для отримання напівпровідників p-типу до атомів кремнію додають алюміній (Al), галій (Ga), бор (B) [26].

Спільна концентрація «електронів» (e_o) та «дірок» (h_o) для будь-якого напівпровідника при заданому значенні температури T можна узагальнено визначити відношенням, яке називають ефектом (законом) мас, що взаємодіють [27]:

$$e_i^2 = e_o \cdot h_o \quad (1.1)$$

Провідність напівпровідникового матеріалу можна визначити якщо знати концентрацію «електронів» e_o та «дірок» h_o за виразом [27]:

$$c = q(\mu_e e_o + \mu_h h_o) \quad (1.2)$$

де q – заряд електрона, Кл,

μ_e – кількість ступенів свободи «електрона»,

μ_h – кількість ступенів свободи «дірки».

Провідність матеріалу n-типу можна визначити за залежністю [27]:

$$c_n = q\mu_e e_o \quad (1.3)$$

Провідність матеріалу p-типу можна визначити за залежністю [27]:

$$c_p = q\mu_h h_o \quad (1.4)$$

У разі наявності домішок, провідність напівпровідників збільшується, від яких визначає тип отриманого напівпровідника, залежності (1.3) і (1.4) набудуть вигляду:

$$c_n = q\mu_e Q_d \quad (1.5)$$

$$c_p = q\mu_h Q_a$$

де Q_d – концентрація донора,

Q_a – концентрація акцептора.

Якщо на фотоелектричний модуль з геометричними розмірами a на b подати напругу U , струм буде протікати через модуль, що викликає дрейф «вільних електронів» і «вільних дірок» під впливом електричного поля E , що розвивається напругою U (рис. 1.9).

На основі закону Ома можна записати:

$$I = qU(\mu_e e + \mu_h h) \cdot \frac{b}{a} \equiv aJ_d \quad (1.6)$$

де J_d – щільність струму дрейфу часток,

Отже, провідність матеріалу типу n можна визначити за формулами:

$$\begin{aligned} J_d &= cE \\ E &= \frac{U}{a} \end{aligned} \quad (1.7)$$

Паралельно з основним струмом у напівпровіднику виникає інший тип струму, який викликається наявністю різниці концентрацій рухомих часток, і який називають дифузійним струмом, значення якого можна визначити за залежністю:

– для «електронів» [27]:

$$J_e = qD_e \frac{\partial e}{\partial x} \quad (1.8)$$

– для «дірок» [27]:

$$J_h = -qD_h \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1.9)$$

де D_e – коефіцієнт дифузії «електронів»,

D_h – коефіцієнти дифузії «дірок»

$\partial e / \partial x$ – градієнт концентрації «електронів»,

$\partial h / \partial x$ – градієнт концентрації «дірок».

Коефіцієнти дифузії D пов'язані з рухливістю за рівнянням [27]:

$$D = \mu \frac{k_B T}{q} = \mu U_T \quad (1.10)$$

де U_T – теплова напруга.

Отже напівпровідниковим матеріалам притаманна залежність від температури та наявності включених елементів.

При інтенсивності сонячної радіації на рівні 800 Вт/м^2 корисна потужність сучасних фотоелектричних елементів на практиці не перевищує 150 Вт/м^2 поверхні фотоелектричного модуля. Різниця між цими значеннями витрачається на посилення коливань кристалічної решітки для подолання замикаючого шару іншими шляхами. Інтенсивність коливань решітки напівпровідникових елементів тісно пов'язана з їхньою температурою, що говорить про необхідність підтримувати температуру цих елементів на досить низькому рівні – при підвищенні робочої температури на $80 \text{ }^\circ\text{C}$ коефіцієнт корисної дії фотоелектричного модуля знижується на 30%. З наведених міркувань виходить, що для зазначених модулів необхідно забезпечити по можливості найкраще відведення тепла шляхом усіх можливих способів теплопередачі.

2 СТВОРЕННЯ АВТОНОМНОЇ УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

2.1 Огляд систем електропостачання відповідальних споживачів енергоємних виробництв

Досить багато промислових об'єктів та адміністративних будівель енергоємних виробництв мають у своїй структурі електроприймачі першої категорії, які вимагають безперебійного електропостачання. Зазначені електроприймачі є досить чутливими до припинення електроживлення та відхилень характерних параметрів якості електричної енергії [28].

Такими електроприймачами першої категорії є: системи пожежогасіння, електроприводи засувов, холодильники, автоматизовані системи управління, системи релейного захисту та автоматики, приводи евакуаційних механізмів, хімічні виробництва, лінії безперервного розливання сталі, прокатні стани, печі для розігріву прокату, газо- та нафтопроводи, приводи перекачувальних станцій, інформаційно-обчислювальні комплекси, сервери та інше [29].

Для живлення зазначених електричних приймачів у системі живлення необхідно передбачити незалежне резервування від стороннього джерела живлення. У якості незалежного джерела живлення можуть бути використані генератори, агрегати безперебійного живлення, акумуляторні батареї та інше.

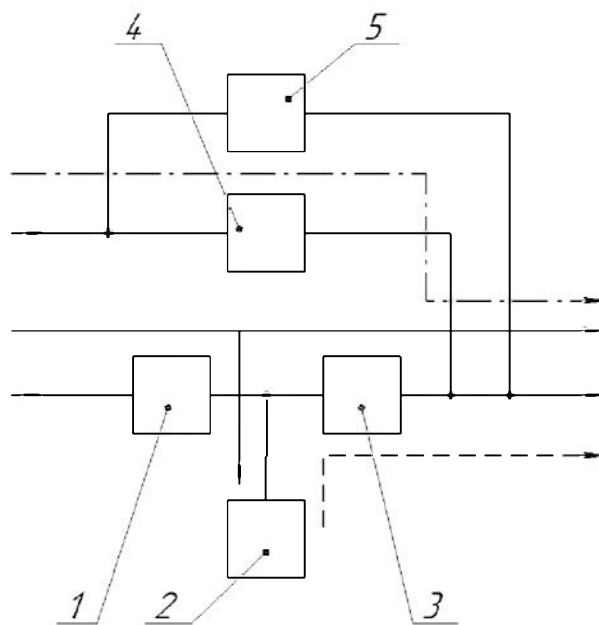
Причинами порушення постачання споживачів електричною енергією можуть бути [30]:

- незадовільна якість електричної енергії,
- аварійні вимкнення,
- вихід обладнання з ладу,
- людський фактор.

Для забезпечення безперебійного електропостачання споживачів широкого застосування знаходять джерела безперебійного живлення (ДБЖ), серед яких виділяють три основні типи: статичного, динамічного та гібридного типу.

Електропостачання від ДБЖ мають ряд особливостей, що визначають неприпустимість застосування до мереж з такими пристроями існуючих методик для перевірки забезпечення захисту мереж [31].

Основні конструктивні елементи джерела безперебійного живлення представлено на рис. 2.1 [31].



1 – випрямляч/зарядний пристрій, 2 – акумуляторні батареї, 3 – інвертор,
4 – автоматичний байпас, 5 – ручний байпас
— – нормальний режим, - - - - автономний режим, - · - · - байпасний режим

Рисунок 2.1 – ДБЖ з подвійним перетворенням

Для даної схеми можна визначити три режими роботи [31]:

- нормальний,
- автономний,
- байпас (резервна мережа живлення).

При нормальному режимі роботи живлення здійснюється по ланцюгу випрямляч-інвертор, при якому відбувається перетворення змінного струму у постійний і навпаки. При невідповідності заданих параметрів мережі живлення або при появі пошкоджень у мережі, система переходить у режим автономної роботи, при якому забезпечується безперервність електропостачання. Живлення здійснюється протягом певного часу, який визначається ємністю встановлених акумуляторних батарей. Наявність статичного байпасу дозволяє здійснити живлення підключеного навантаження без переривання електропостачання у разі ушкодження ДБЖ, різкої зміни струму навантаження, виникнення перевантаження, критичного розряду батареї. Дана робота повинна розглядатися тільки як аварійний режим, оскільки забезпечення навантаження не може бути захищена належним чином.

Обидві зазначені системи живлення потребують синхронізації для забезпечення безперервності електропостачання.

Перевагами зазначеної схеми можна зазначити постійність підтримки вихідної напруги на виході ДБЖ, можливість обособленості навантаження від мережі, захист від перенапруг та імпульсних струмів, можливість регулювання вихідної напруги, широкий діапазон підтримки і регулювання вихідної напруги, миттєвий перехід у автономний режим роботи при різного виду пошкодженнях, безперервність електропостачання.

Недоліком даної системи є висока вартість, додаткова витрата енергії на непродуктивні перетворення у інверторі.

2.2 Розрахунок автономної установки з фотоелектричними модулями

Загальну потужність фотоелектричних модулів та їхню необхідну кількість можна визначити зі знання кількості енергії, яку необхідно

отримати для живлення навантаження. Передбачається автономне живлення трьох вентиляторів з асинхронним приводом, що використовуються для цілодобового провітрювання хімічних цехів, що також працюють цілодобово. Загальна номінальна потужність приводних двигунів вентиляторів, що мають безперервно працювати – 15 кВт.

Добову кількість енергії, необхідна для приводу вентиляторів, розрахуємо за формулою, кВт·год [32]:

$$P_{пр.} = n \cdot P_{вент.} \cdot t_p. \quad (2.1)$$

де n – кількість одночасно працюючих вентиляторів, $n = 3$ шт.,

$P_{вент.}$ – номінальна потужність вентилятора, $P_{вент.} = 3$ кВт.

t_p – час роботи одного вентилятора протягом доби, $t_p = 24$ год.

Вентилятори працюють цілодобово протягом року, тому добове споживання електричної енергії приводами складе $P_{пр.} = 216$ кВт.

Величину сонячної інсоляції, необхідної для виробки необхідної кількості електричної енергії, що виробляється фотоелектричними модулями для даної широти заносимо до табл. 2.1.

Встановлення нахилу фотоелектричних модулів здійснюється для всіх панелей у фотоелектричному полі і впливає на величину загальної площі цього поля.

Необхідну площу фотоелектричного поля у залежності від кута нахилу модулів розрахуємо за формулою, м² [32]:

$$F_{фп} = \frac{P_{пр.}}{P_{в.фм.}} \quad (2.2)$$

де $P_{в.фм.}$ – виробка енергії фотоелектричним модулем, значення якої беремо з табл. 2.1, кВт·год/м².

Таблиця 2.1 – Питома потужність сонячної інсоляції, кВт/м² [33]

Час доби, годин	Місяць року											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>4.00–5.00</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	0,54	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>5.00–6.00</i>	0,00	0,00	0,00	0,48	0,54	0,60	0,54	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>6.00–7.00</i>	0,00	0,00	0,48	0,54	0,60	0,66	0,60	0,54	0,36	0,00	0,00	0,00
<i>7.00–8.00</i>	0,00	0,36	0,54	0,60	0,66	0,72	0,66	0,60	0,48	0,36	0,00	0,00
<i>8.00–9.00</i>	0,24	0,40	0,60	0,66	0,72	0,78	0,72	0,66	0,54	0,40	0,36	0,18
<i>9.00–10.00</i>	0,30	0,48	0,66	0,72	0,78	0,80	0,74	0,70	0,60	0,48	0,40	0,24
<i>10.00–11.00</i>	0,36	0,50	0,72	0,74	0,79	0,84	0,78	0,73	0,62	0,54	0,42	0,26
<i>11.00–12.00</i>	0,42	0,54	0,74	0,78	0,84	0,90	0,84	0,78	0,66	0,60	0,48	0,30
<i>12.00–13.00</i>	0,42	0,54	0,74	0,78	0,84	0,90	0,84	0,78	0,66	0,60	0,48	0,30
<i>13.00–14.00</i>	0,36	0,50	0,72	0,74	0,79	0,84	0,78	0,73	0,62	0,54	0,42	0,26
<i>14.00–15.00</i>	0,30	0,48	0,66	0,72	0,78	0,80	0,74	0,70	0,60	0,48	0,40	0,24
<i>15.00–16.00</i>	0,24	0,40	0,60	0,66	0,72	0,78	0,72	0,66	0,54	0,40	0,36	0,18
<i>16.00–17.00</i>	0,00	0,36	0,54	0,60	0,66	0,72	0,66	0,60	0,48	0,36	0,00	0,00
<i>17.00–18.00</i>	0,00	0,00	0,48	0,54	0,60	0,66	0,60	0,54	0,36	0,00	0,00	0,00
<i>18.00–19.00</i>	0,00	0,00	0,00	0,48	0,54	0,60	0,54	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>19.00–20.00</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	0,54	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Результати розрахунків за (2.2) зводимо до табл. 2.2, а відповідні графічні залежності – на рис. 2.1.

Таблиця 2.2 – Виробка електричної енергії фотоелектричним модулем протягом року, кВт·год/м²

Місяць року	Кут нахилу фотоелектричного модуля, град.			
	70	75	80	85
<i>Січень</i>	0,66	0,66	0,66	0,65
<i>Лютий</i>	0,85	0,84	0,84	0,83
<i>Березень</i>	0,91	0,87	0,87	0,85
<i>Квітень</i>	0,74	0,71	0,68	0,66
<i>Травень</i>	0,62	0,57	0,52	0,48
<i>Червень</i>	0,59	0,54	0,50	0,47
<i>Липень</i>	0,57	0,52	0,49	0,45
<i>Серпень</i>	0,59	0,55	0,51	0,48
<i>Вересень</i>	0,59	0,56	0,54	0,50
<i>Жовтень</i>	0,67	0,67	0,66	0,65
<i>Листопад</i>	0,74	0,74	0,74	0,73
<i>Грудень</i>	0,52	0,52	0,52	0,51

Таблиця 2.2 – Необхідна площа фотоелектричного поля, м²

Місяць року	Кут нахилу фотоелектричного модуля, град.			
	70	75	80	85
<i>Січень</i>	326	326	326	331
<i>Лютий</i>	254	257	257	260
<i>Березень</i>	237	248	248	254
<i>Квітень</i>	291	303	316	326
<i>Травень</i>	346	376	412	455
<i>Червень</i>	364	397	428	464
<i>Липень</i>	376	412	445	485
<i>Серпень</i>	364	390	420	455
<i>Вересень</i>	364	383	397	428
<i>Жовтень</i>	321	321	326	331
<i>Листопад</i>	291	291	291	295
<i>Грудень</i>	412	412	412	420

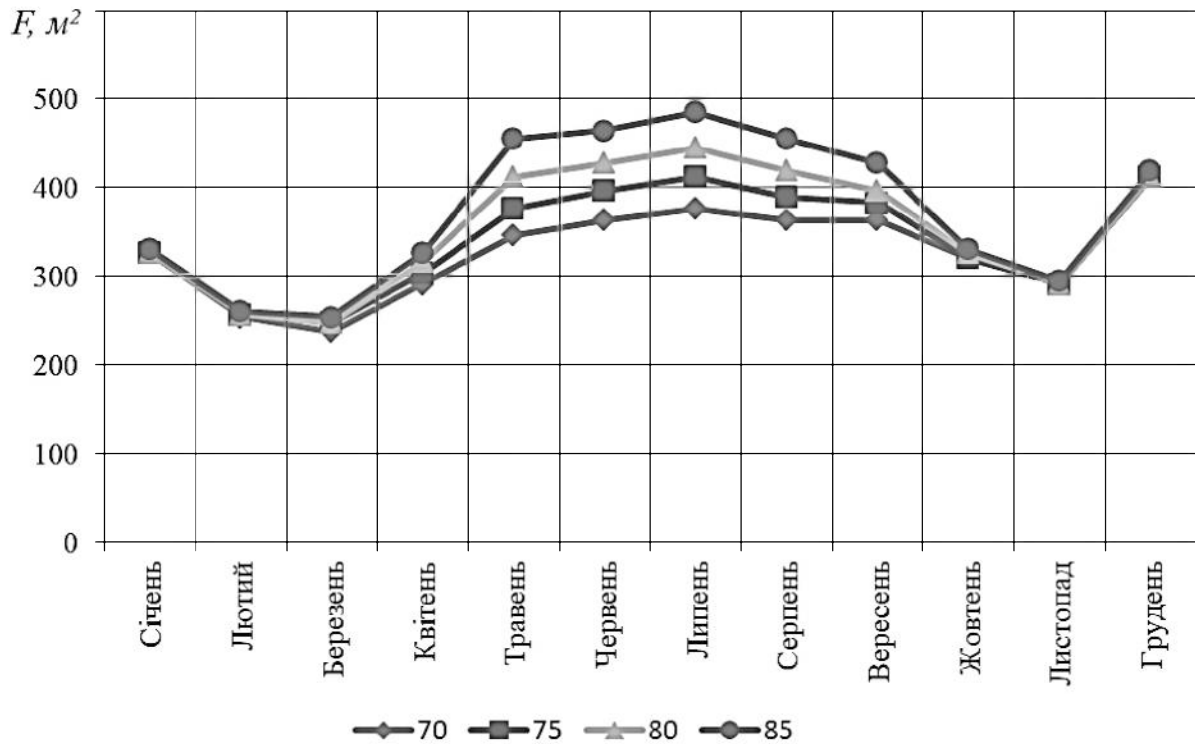


Рисунок 2.1 – Графічні залежності для визначення необхідної площі фотоелектричного поля

З рис. 2.1 видно, що найменшу площу фотоелектричного поля можна отримати при куті нахилу панелей у 70 град.

Кількість фотоелектричних модулів (площа фотоелектричного поля) повинна забезпечити електричною енергією при номінальній потужності і визначеному куті їх встановлення, Площа фотоелектричного поля за попередніми даними складає 376 м², тому кількість фотоелектричних модулів можна визначити за формулою [32]:

$$n_{\text{фм}} = \frac{S_{\text{фп}}}{S_{\text{фм}}} \quad (2.3)$$

де $S_{\text{фп}}$ – площа фотоелектричного поля, $S_{\text{фп}} = 376 \text{ м}^2$,

$S_{\text{фм}}$ – площа фотоелектричного модуля, м².

У якості фотоелектричних модулів приймаємо монокристалічні панелі Sunpower MAXEON E20, які виготовлено з високоякісного монокристалічного кремнію N-типу з мінімальною кількістю домішок. Панелі мають вкриту оловом мідну основу з високим показником теплопровідності, пластичності та стійкі до корозійного зношування.

У конструктивній частині панелі мають потрійні додаткові з'єднання із вбудованим механізмом зменшення натягу та застосовано спеціальний герметик, що має високу стійкість до впливу вологи та перенапруг. Ці заходи значно покращують поведінку панелей при їх температурних і коливальних розширеннях та скороченнях. Для збільшення виробки електричної енергії у хмарні дні та розширення спектральної чутливості у панелях застосовано антиблікове скло.

Основні технічні характеристики фотоелектричного модуля наведено у табл. 2.3, а загальний вигляд панелі – на рис. 2.2.

$$n_{\text{фм}} = \frac{376}{2,162} \approx 173 \text{ шт.}$$

Приймаємо кількість фотоелектричних модулів у кількості 173 шт.

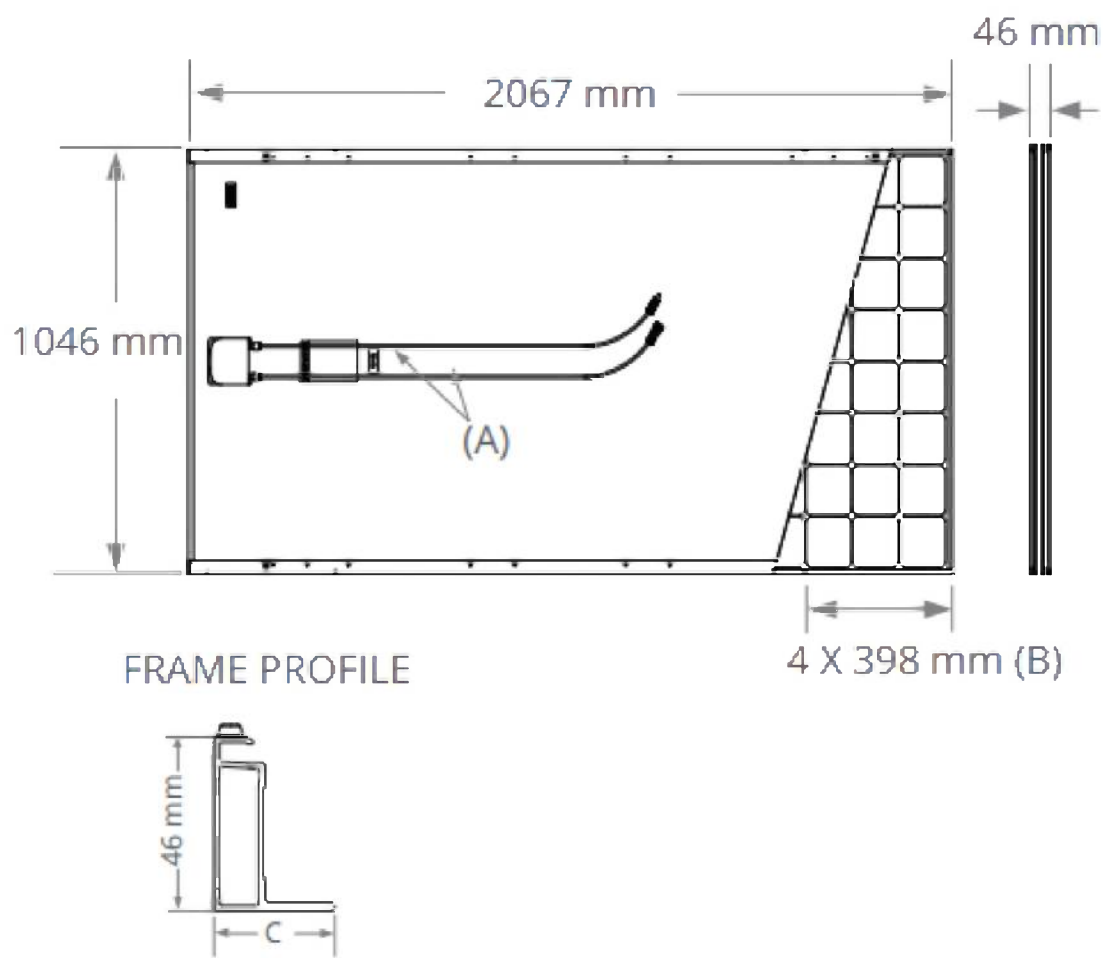
Потужність навантаження розрахуємо з урахуванням коефіцієнта попиту, $k_{\text{п}} = 1,1$ [21]:

$$P_{\text{н}} = 1,1 \cdot P_{\text{н}} = 1,1 \cdot 216 = 237,6 \text{ кВт} \quad (2.4)$$

Приймаємо до застосування гібридний інвертор SYL GES250KT, технічні характеристики якого наведено у табл. 2.4 [34].

Таблиця 2.3 – Основні характеристики фотоелектричного модуля Sunpower MAXEON E20 [35]

Параметр	Од. виміру	Значення
Потужність STC	Вт	435
Напруга MPPT	В	72,9
Струм MPPT	А	5,97
Напруга холостого ходу	В	85,6
Струм короткого замикання	А	6,43
ККД	%	20,1
Температурний коефіцієнт	%/°C	– 0,35
Довжина	мм	2067
Ширина	мм	1046
Висота	мм	46
Площа панелі	м ²	2,162
Маса	кг	25,4



(A) Cable Length: 1230 mm +/-10 mm

(B) Stacking Pins

(C) Long Side: 32 mm

Short Side: 22 mm

Рисунок 2.2 – Габаритні розміри фотоелектричного модуля Sunpower MAXEON E20

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики гібридного інвертора
SYL GES250KT

Параметр	Од. виміру	Значення
Максимальна потужність по постійному струму	кВт	275
Максимальний постійний струм	А	573
Номінальна потужність по змінному струму	кВт	250
Максимальна потужність по змінному струму	кВт	275
Максимальний змінний струм	А	397
Спотворення по третій гармоніці	–	<3% (номінальна потужність)
Номінальна напруга мережі	В	400
Діапазон напруги мережі	В	320 – 460
Номінальна частота мережі	Гц	50
Діапазон частот мережі	Гц	45 – 55
Топологія	–	безтрансформаторна
Максимальний ККД	%	97,3
Розміри ШхВхГ	мм	1200x2000x800
Вага	кг	1200
Діапазон робочих температур	°С	від –30 до +55
Власне споживання при зупинці	Вт	< 40
Метод охолодження	–	примусове повітряне охолодження
Клас захисту IP	–	IP20
Відносна вологість	–	0 – 95%, без конденсату
Рівень шуму	дБ	< 70
Комунікація BMS	–	RS485, CAN
Порти зв'язку	–	RS485, CAN, Ethernet
Протокол зв'язку	–	IEC104 / Modbus RTU / Modbus TCP / CAN

Для вибору акумуляторів для безперебійного живлення вентиляторних установок необхідно знати необхідну кількість енергії для живлення у найважчий період та ємність акумуляторів.

Ємність акумуляторних батарей визначимо за формулою, А·год [32]:

$$C_{\text{розр.}} = \frac{P_{\text{пр}}}{U_{\text{ном.АБ}}} \quad (2.5)$$

де $U_{\text{ном.АБ}}$ – номінальна напруга акумуляторної батареї, $U_{\text{ном.АБ}} = 12 \text{ В}$.

$$C_{\text{розр.}} = \frac{216 \cdot 10^3}{2} = 18 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Акумуляторні батареї за правилами технічної експлуатації не можна розряджати їх нижче 75%, ємність батарей приймаємо у 1,5 рази більшою за розрахункове значення:

$$C_{\text{АБ}} = 18 \cdot 10^3 \cdot 1,5 = 27 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot \text{год}.$$

Приймаємо до застосування гелеві акумуляторні батареї EverExceed DP-12300, технічні характеристики яких наведено у табл. 2.5 [36].

Дані акумулятори забезпечують 20-годинну ємність у 300 А·год, мають найнижчу вартість у перерахунку на 1 А·год і найменші габарити відносно запасеної енергії. У зв'язку з цим їх використання добре підходить для застосування у системах безперебійного і автономного живлення, інверторних системах безперебійного живлення й інше .

Розрахункова кількість акумуляторних батарей – 90 шт.

Таблиця 2.5 – Основні технічні характеристики акумуляторних батарей Pulsar [36]

Параметр	Од. виміру	Значення
Тип акумулятора	—	AGM VRLA
Ємність акумулятора	А·год	300
Напрацювання (DOD 100%)	циклів	750
Напрацювання (DOD 50%)	циклів	2000
Номинальна напруга	В	12
Габарити ДхШхГ	мм	520x238x220
Вага	кг	76

За значеннями струму на навантаженні і заряджання обираємо контролер JUTA CM8024Z, технічні характеристики якого наведено у табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Основні технічні характеристики контролера JUTA CM8024Z [37]

Параметр	Од. виміру	Значення
Технологія	—	ШИМ (PWM)
Напруга акумуляторних батарей	В	12/24
Максимальний струм заряду акумуляторів	А	80
Максимальна напруга холостого ходу сонячних панелей	В	50
Ступінь захисту	—	IP20
Габарити ДхШхГ	мм	194x188x89
Вага	кг	1,09

Сонячна енергія має достатньо високий потенціал для здійснення автономного живлення споживачів першої категорії.

Основна проблема використання даного виду енергії – її зміна протягом доби та року, тобто сезонна нерівномірність виробки. На допомогу цьому недоліку можуть прийти засоби акумулювання енергії.

У останні роки ціна фотоелектричних систем знизилась через здешевлення виробництва окремих компонентів, особливо сонячних панелей та застосування прогресивних технологій.

3 ОСНОВИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З МОЖЛИВІСТЮ ВІДСТЕЖЕННЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Як було зазначено вище, попит на електричну енергію, виробленої за допомогою фотоелектричних систем обумовлений тим, що виробка цієї енергії здійснюється у доброзичливому стані до навколишнього середовища, безпосередньо перетворюючи сонячну енергію у електричну енергію [38].

Сонячна інсоляція постійно змінюється впродовж доби, а потреба у енергії визначених параметрів є постійною і не повинно залежати від коливань сонячної інсоляції та температури навколишнього середовища. Для здійснення поставленої мети необхідно використання, так званих, МРРТ-трекерів. Його задача – пошук точки максимальної потужності.

Максимальна потужність фотоелектричних панелей знаходиться у сильній залежності від погодних умов та стану середовища поблизу сонячних панелей.

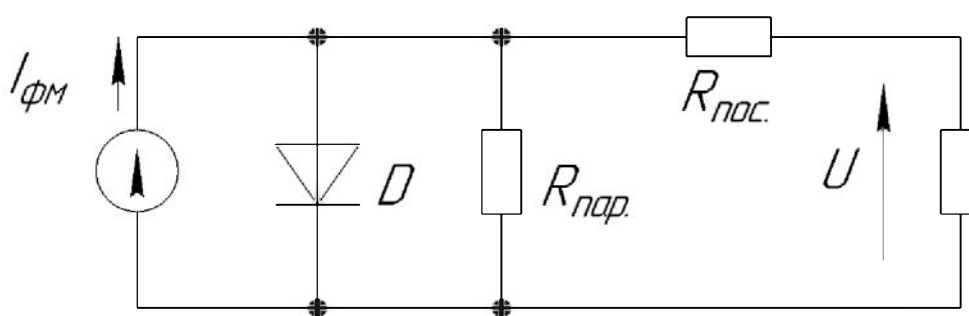
Для максимізації ефективності та надійності роботи сонячних модулів необхідно передбачати їх роботу за умови видачі максимальної потужності. Цю максимальну потужність необхідно відстежувати, з чим досить добре пораються МРРТ-трекери. Дані пристрої здатні досить правильно прогнозувати «точку максимальної потужності» у різних умовах стану навколишнього середовища. На даний процес також впливає зміна навантаження, значень вхідних струмів і напруг [38].

Однією з суттєвих проблем при відстеженні точки максимальної потужності (ТМП) є робота фотоелектричних модулів при затіненні та зміні атмосферних умов, що впливає з того, що ця величина суттєво залежить від комбінації зазначених факторів.

Для відстеження точки максимальної потужності є багато способів і методів. Найбільшого поширення набули способи зміни провідності та реакції на збурення через простоту їх застосування. Підсилюючий перетворювач використовується у якості проміжного перетворювача для швидкого перемикання між режимами та регулювання вихідної потужності. У більшості випадків діапазон потужності фотоелектричної панелі коливається від 150 до 300 Вт, а діапазон зміни напруги у ТМП знаходиться в межах 20 – 40 В [39].

Перетворювач постійного струму застосовується для перетворення напруги з низького рівня на рівень, зручний для перетворення. Перетворювачі постійного струму при використанні для цієї мети має такі характеристики: високий коефіцієнт підсилення напруги та високий коефіцієнт корисної дії.

Для пошуку оптимальних параметрів роботи фотоелектричної системи можна застосувати модель даних фотоелектричних систем. У якості дослідної моделі можна використати схему з одним діодом у електричному ланцюзі, як ідеалізований фотоелектричний модуль, з'єднаного паралельно з джерелом струму (рис. 3.1).



1 – джерело струму (імітує сонячне випромінювання), 2 – діод (імітує властивості напівпровідникового елемента), 3 – паралельний опір (імітує опір напівпровідникового елемента), 4 – послідовний опір (імітує активні опори у фотоелектричному модулі)

Рисунок 3.1 – Модель фотоелектричного модуля

Джерело струму генерує фотострум, який є пропорційним до падаючого сонячного опромінення та до температури середовища. Діод являє собою р-п-перехід сонячної панелі. Опори (послідовний і паралельний) реальних сонячних панелей реалізують втрати напруги на шляху руху струму.

Для даної схеми можна записати рівняння для знаходження зворотного струму насичення при заданій сонячній інсоляції та визначеній температурі [40, 41]:

$$I_{зв} = \frac{I_{кз}}{e^{\frac{qU_{фм}}{\alpha nT}} - 1} \quad (3.1)$$

де $I_{кз}$ – струм короткого замикання при нормалізованих умовах (температура 25 °С і сонячне випромінювання 1 кВт/м²),

q – величина заряду електрона, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл,

$U_{фм}$ – вихідна напруга фотоелектричного модуля,

α – поправочний коефіцієнт, $\alpha = 1,3$,

T – поточна температура, К,

Струм насичення можна визначити за залежністю [40, 41]:

$$I_{нас.} = I_{зв.} \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^3 \cdot e^{\frac{q \cdot E_g}{\alpha \cdot k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)} \quad (3.2)$$

де T_0 – еталонна температура, К,

E_g – енергія ширини перехідної зони обраного напівпровідникового матеріалу [5],

k – постійна Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Створений фотоелектричним модулем струм визначається за залежністю [40, 41]:

$$I_{\text{фм}} = \frac{\lambda \cdot [I_{\text{кз}} + k_T \cdot (T - 298)]}{1000} \quad (3.3)$$

де λ – освітленість фотоелектричного модуля, Вт/см²,

k_T – температурний коефіцієнт струму короткого замикання.

Вихідний струм з фотоелектричного модуля [40, 41]:

$$I_0 = n_{\text{пар.}} \cdot I_{\text{фм}} - n_{\text{пар.}} \cdot I_{\text{нас.}} \cdot \left[e^{\frac{q \cdot (U_{\text{фм}} + I \cdot R_{\text{пос.}})}{\alpha \cdot n_{\text{посл.}} \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{U_{\text{фм}} + I \cdot R_{\text{пос.}}}{R_{\text{пар.}}} \quad (3.3)$$

де $n_{\text{пар.}}$ – кількість паралельно з'єднаних елементів, шт.,

$n_{\text{посл.}}$ – кількість послідовно з'єднаних елементів, шт.,

$I_{\text{нас.}}$ – струм насичення, А,

$R_{\text{пос.}}$ – послідовний опір, Ом,

$R_{\text{пар.}}$ – паралельний (шунтуючий) опір, Ом.

Для спрощення аналізу втратами у послідовному опорі нехтують, а паралельний опір вважають нескінченим: $R_{\text{пос.}} = 0$ та $R_{\text{пар.}} = \infty$.

Сонячні елементи належать до напівпровідникових приладів і тому є досить чутливими до температури і ця залежність зворотно-пропорційна до неї. Зростання температури модуля під впливом температури навколишнього середовища зменшує ширину електронного переходу у напівпровіднику, що впливає на його параметри. Цю ситуацію можна розглядати як збільшення енергії електронів у матеріалі напівпровідника. Збільшення температури зменшує ширину зазору, що призводить до збільшення фотоструму. Найбільш суттєво підвищення температури впливає на напругу розімкнутого контуру – вона зменшується – та паралельно збільшує темп насичення фотоелемента – цей вплив показано на рис. 3.2 [40, 41].

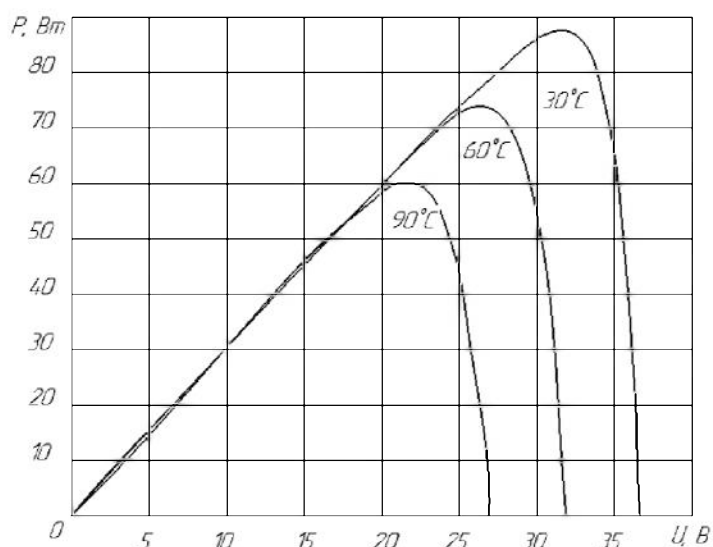


Рисунок 3.2 – Енергетична характеристика фотоелектричного модуля при різних значеннях температури

Струм фотоелектричного модуля прямо пропорційний сонячному опроміненню, а його напруга має логарифмічну залежність від нього.

Сонячне опромінення прямо пропорційно вихідному струму та коефіцієнту корисної дії, що визначає прямий зв'язок між вихідним струмом, сонячним опроміненням та коефіцієнтом корисної дії.

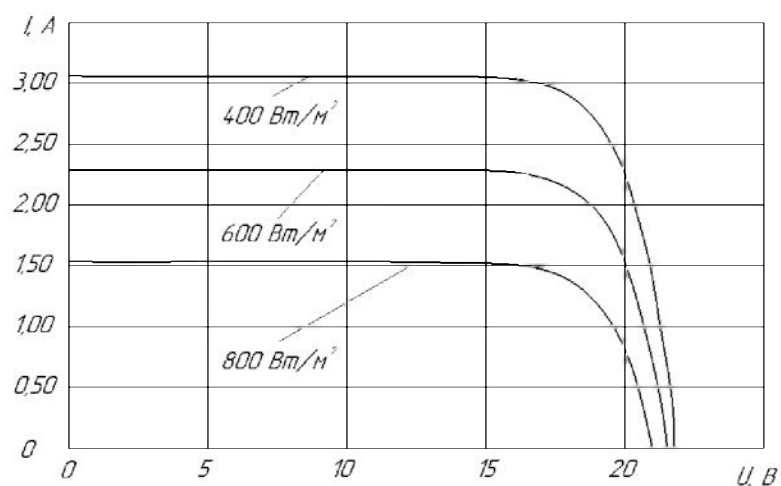


Рисунок 3.3 – Вольт-амперна характеристика фотоелектричного модуля при різних значеннях сонячного випромінювання

Відстеження точки максимальної потужності полягає необхідно для вирішення постійності величини потужності на навантаженні. Це досягається зміною значення вхідного опору панелі відповідно до зміни опору навантаження (шляхом зміни роботи фотоелектричного модуля). З цією метою застосовують перетворювач постійного струму.

Коефіцієнт корисної дії перетворювача постійного струму збільшується при зниженні напруги і зменшується при підвищенні.

Середньостатистична сонячна панель перетворює у електричну енергію лише до 40% падаючого на неї сонячного світла. Максимальну потужність матимемо у разі, коли повний опір джерела співпадає з повним опором навантаження, тобто задача відстеження точки максимальної потужності зводиться до пошуку способу або методу узгодження повних опорів [40, 41].

З боку фотоелектричного модуля необхідно використати підсилювальний перетворювач, підключений до нього, для того щоб підвищити вихідне значення напруги до величини, яка визначається допустимим значенням на навантаженні.

Шляхом впливу певним чином на робочий цикл імпульсного перетворювача можна досягти рівності значення загального опору джерела і значення загального опору навантаження.

До того ж необхідно враховувати, що за різного значення рівня освітленості та температури панелі максимальне значення потужності та відповідна напруга фотоелектричного модуля безперервно змінюються. Це твердження вимагає постійного відстеження точки максимальної потужності для забезпечення максимальної енерговіддачі у будь-який період часу.

У сучасних фотоелектричних системах для досягнення максимальних енергетичних показників фотоелектричної установки забезпечується шляхом розподілу станції на послідовно-паралельно підключені фотоелектричні модулі з можливістю забезпечення максимальної виробки

потужності для кожного «зібраного» масиву шляхом регулювання роботи перетворюючого підсилювача [42].

Існує безліч можливих способів та алгоритмів даної процедури пошуку, які один від одного відрізняються за складністю, точністю, швидкодією та вартістю реалізації. Найширшого застосовування набули методи, що реалізують алгоритм визначення найбільшого значення (ВНЗ) та метод штучного збурення та спостереження (ШЗС). Ці методи у своїй снові спираються на створення штучного збурення (для ВНЗ) або відстеження опорної вхідної напруги (для ШЗС) на перетворювачі та наступного вимірювання потужності внаслідок цього збурення. Збільшення або зменшення напруги ліворуч або праворуч від точки, що відповідає максимальній потужності, що призводить до збільшення або зменшення потужності, що виробляється фотоелектричним модулем. Іншими словами, заданий алгоритм визначає, яким чином зовнішнє збурення вплинуло на зміну вихідної потужності (з позитивного або негативного боку) і прийняттям рішення про величину та напрямок наступної хвилі збурення для досягнення максимальної точки потужності [43].

При застосуванні методу ВНЗ встановлений у схемі контролер регулює напругу, починаючи з якоїсь незначної величини з можливих значень і потім вимірюється вихідна потужність. Після цього значення напруги збільшується і в разі, коли потужність збільшується отримані налаштування зберігаються. Коли значення потужності не збільшується при зміні напруги, напрямок змінюють.

При застосуванні методу ШЗС використовується алгоритм, що керує зміною провідності і що може створити коливання вихідної потужності, а також враховувати мінливі атмосферні впливи. Цей метод дозволяє обчислювати точку максимальної потужності шляхом порівняння введеного значення провідності з провідністю фотоелектричного масиву – у разі співпадіння цих значень отримаємо максимальне значення

потужності. У результаті цих маніпуляцій отримуємо криву лінію, що визначає розташування точок, що відповідає максимуму потужності для фотоелектричного масиву, що розглядається, та забезпечити максимальну потужність. Аналізуючи графіки поточної напруги фотоелектричного модулю (рис. 3.4) можна сказати, що максимальну потужність можна отримати при дещо меншому струмі короткого замикання та меншій напруги холостого ходу [39–41].

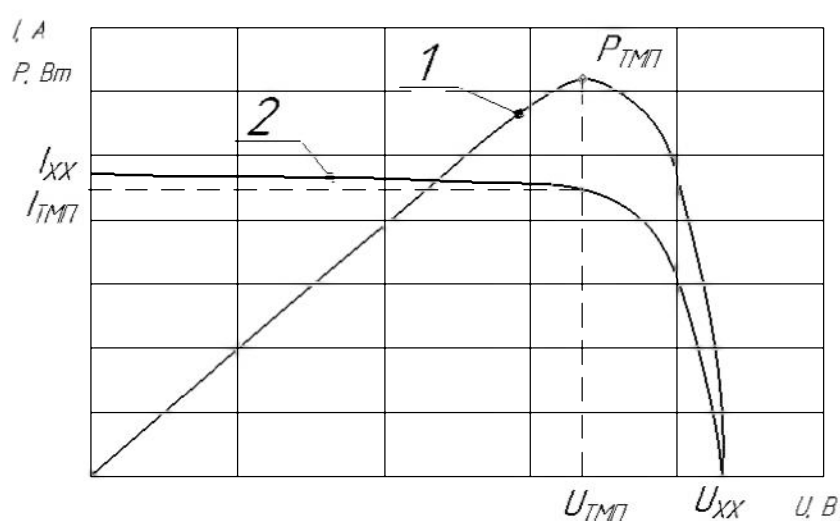
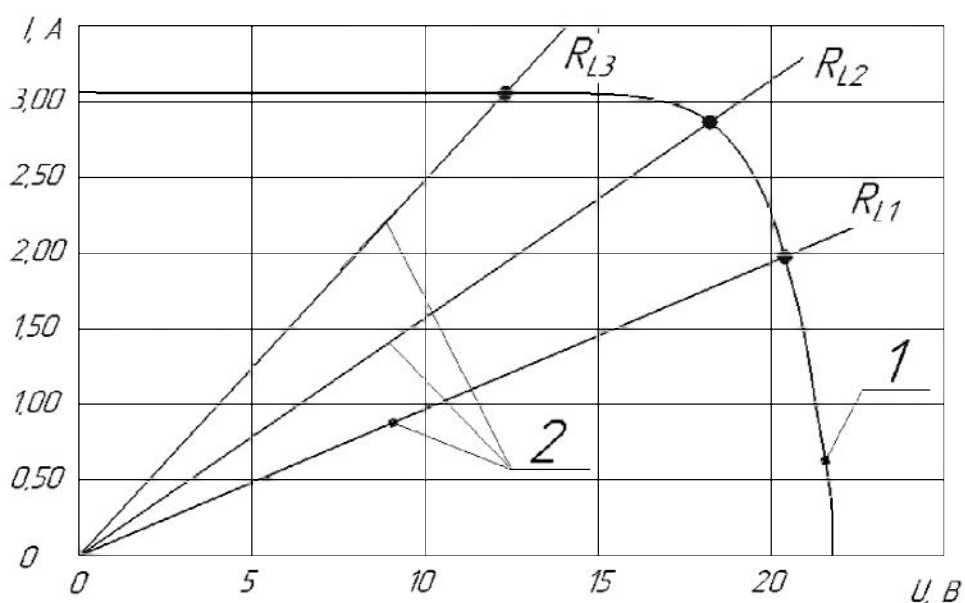


Рисунок 3.4 – Спільний розгляд енергетичної (1) і вольт-амперної характеристики (2) фотоелектричного модуля

Потреба у наявності систем відстеження максимальної потужності виникає внаслідок існування недоліків простих фотоелектричних систем. Затінені місця фотоелектричних модулів являють недовироблену енергію, що може бути використана для живлення додаткового навантаження або використана для заряджання акумуляторних батарей.

Зазвичай, фотоелектричний масив генерує більше енергії, ніж може навантаження (або акумулятори) здатні «поглинути». Надлишок цієї енергії «розсіюється» або у контролері заряду, або у дисипаторі надлишкової потужності у вигляді тепла розсіювання.

Поняття точки максимальної потужності передбачає подачу максимальної доступної потужності джерела, незалежно від коливань виробки, що спричинені зовнішнім середовищем або часом доби. Оптимальна передача енергії є результатом адаптивного управління схемою регулювання потужності за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), для досягнення ефективної відповідності вхідному опору. Тобто, робота систем відстеження ТМП базується на використанні методів ШІМ для досягнення відповідності між повними опороми у системі – положення цієї точки можна змінювати, змінюючи значення повного опору системи вздовж вольт-амперної характеристики – рис. 3.5.



1 – характеристика фотоелектричного модуля, 2 – характеристика навантаження

Рисунок 3.5 – Зміна положення «робочої точки» при зміні опору навантаженням

Система, що дозволяє реалізувати пошук ТМП, містить пристрій з широтно-імпульсною модуляцією, який за змістом та принципом дії є трансформатором повного опору системи постійного струму, здатним змінювати опір від нуля до нескінченного значення – тобто від короткого

замикання до розімкнення ланцюга у залежності від величини зміни опору навантаження (рис. 3.6).

Зміну повного опору за допомогою широтно-імпульсної модуляції можна отримати за допомогою регулювання відкриття керованого силового елемента (перемикача) із заданою частотою f . Відношення часу закриття t_{ON} до періоду T визначає робочий цикл α , який можна змінювати за допомогою двох перших параметрів.

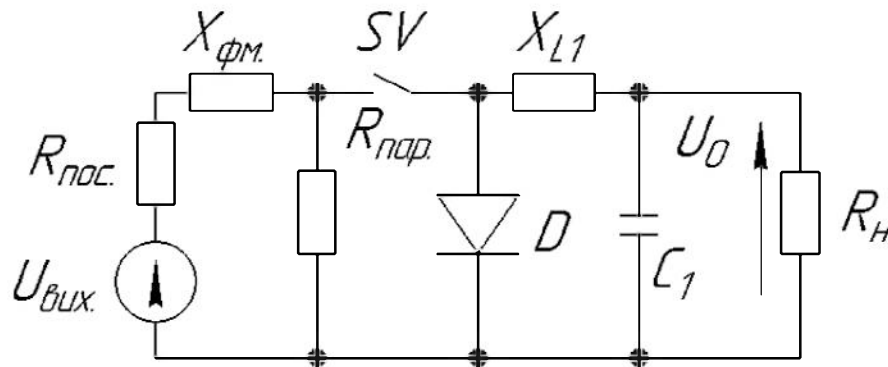


Рисунок 3.6 – Спрощена схема базової схеми ШІМ

Якщо середня потужність, що подається на R_H , є потужністю постійного струму, то значення ефективного вхідного опору можна записати наступним чином:

$$R_{\text{пар.}} = \frac{U_{\text{вих.}}^2}{P_{\text{фм}}} \quad (3.4)$$

де $U_{\text{вих.}}$ – напруга, що продукується джерелом (фотоелектричним модулем), В,

$P_{\text{фм}}$ – потужність, що продукується джерелом (фотоелектричним модулем), Вт, яка з огляду на теоретичну відсутність втрат дорівнює:

$$P_{\text{вих.}} = P_o = \frac{U_o^2}{R_H} \quad (3.5)$$

тоді

$$R_{\text{пар.}} = \frac{U_{\text{вих.}}^2}{U_o^2} \cdot R_{\text{н}} \quad (3.6)$$

У разі застосування усереднюючого фільтра з параметрами L_1 , C_1 , R_1 , можна записати:

$$U_o = \alpha \cdot U_{\text{вих.}} \quad (3.7)$$

де α – робочий цикл (цикл пропускання струму),

$$\alpha = \frac{t_3}{T} \quad (3.8)$$

де t_3 – час закриття, с,

T – період, с

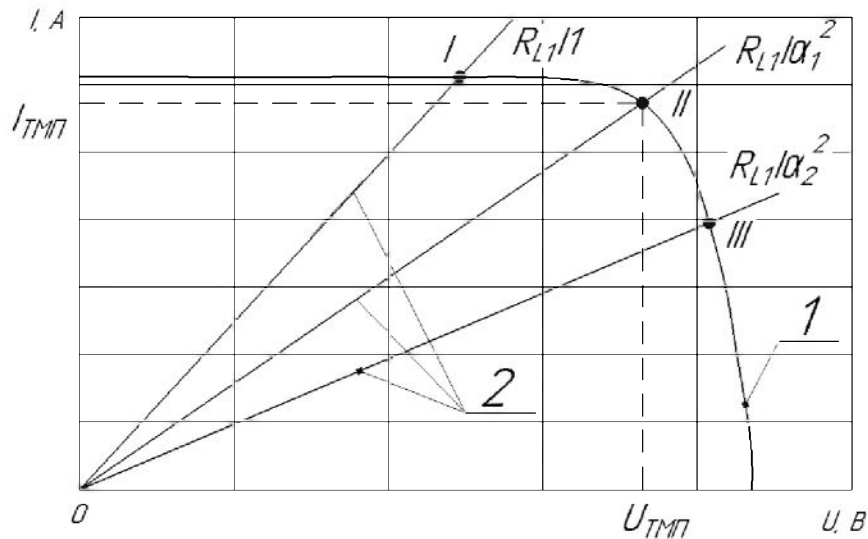
Тому можна записати:

$$R_{\text{пар.}} = \frac{U_o^2 \cdot X_{L1}}{U_o^2 \cdot \alpha^2} = \frac{X_{L1}}{\alpha^2} \quad (3.9)$$

З виразу (3.9) можна зробити висновок, що шляхом зміни циклу відкриття напівпровідникового елемента (тобто створення відповідного циклу широтно-імпульсної модуляції) можна контролювати (змінювати) вхідний опір фотоелектричного модуля і досягати рівня максимальної потужності (рис. 3.7).

Маючи певні значення X_{L1} отримуємо точку перетину модуля ШІМ з вольт-амперною характеристикою модуля. При значенні напруги (струму), що відповідають нижчому або вищому значенню ТМП при даному опорі, починаємо змінювати значення відкриття (α), що, при правильному виборі

напрямку, призведе до зміщення робочої точки до точки максимальної потужності фотоелектричного модуля [39–41].



1 – характеристика фотоелектричного модуля, 2 – характеристика навантаження (I, III – робочі точки навколо ТМП, II – ТМП)

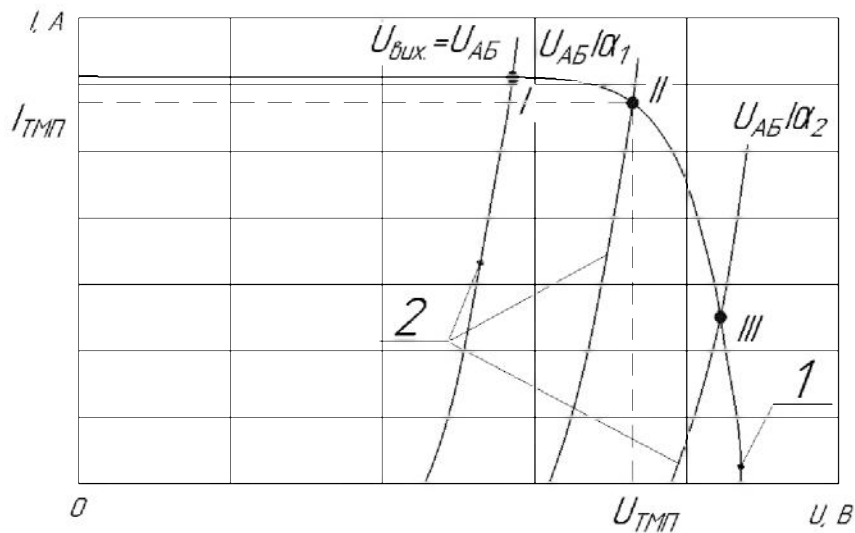
Рисунок 3.7 – ШІМ-керування ефективною лінією навантаження

У разі використання у якості навантаження акумуляторних батарей міркування такі ж, але у такому випадку вихідна напруга повинна дорівнювати напрузі на клеммах акумулятора (рис. 3.8).

Значення напруги, що подається на клеми акумулятора [43]:

$$U_{\text{вих.}} = \frac{U_{\text{АБ}}}{\alpha} \quad (3.9)$$

Обравши значення $U_{\text{АБ}}$, яке буде нижчим за максимальне значення потужності напруги фотоелектричного масиву, можна визначити таке значення α , при якій на акумулятор буде подаватися максимальна потужність від джерела.



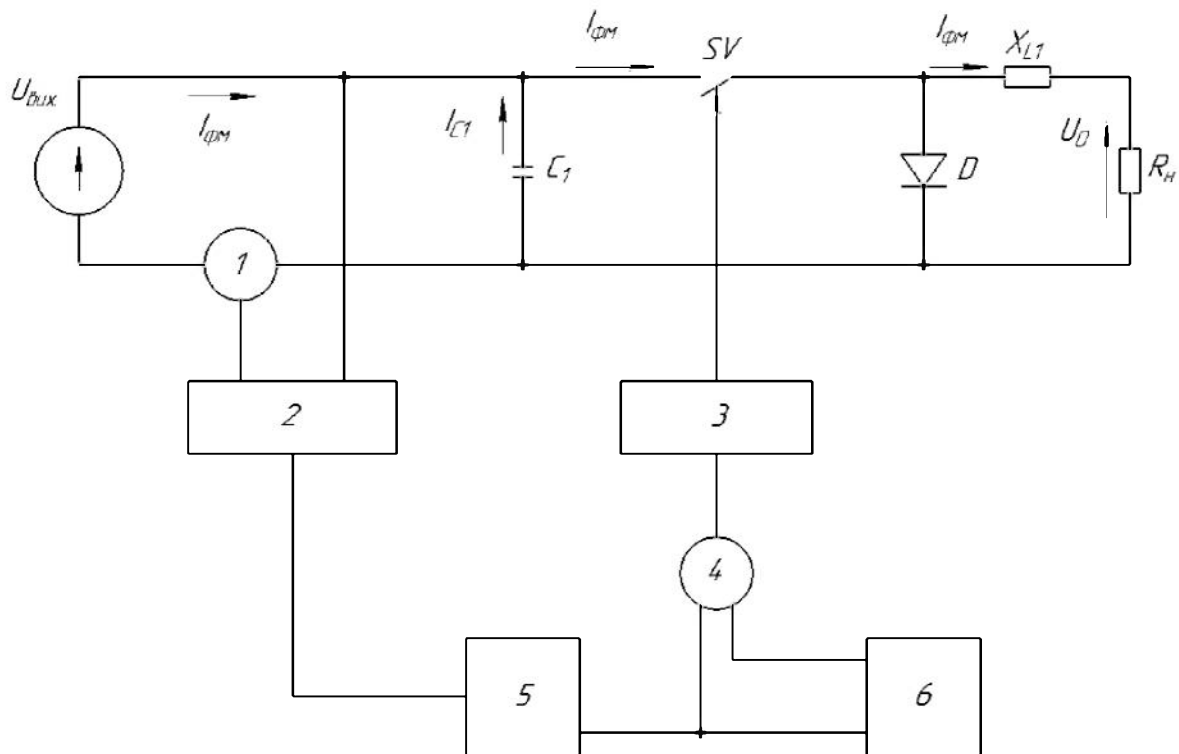
1 – характеристика фотоелектричного модуля, 2 – характеристика акумуляторних батарей (I, III – робочі точки навколо ТМП, II – ТМП)

Рисунок 3.8 – ШІМ-керування навантажувальної лінії типу акумулятора

Система пошуку точки максимальної потужності працює за принципом слідкування і повільної зміни положення «робочої точки» джерела фотоелектричної енергії. Механізм контролю вимірює вихідне значення струму, яке використовується для модуляції імпульсу з метою відстеження ТМП [40].

З огляду на те, що вихідна потужність прямо пропорційна значенню вихідного струму, необхідно максимізувати значення вихідного струму. Обмеження для використання даної системи визначається можливістю виникнення коливальних перехідних процесів та обмеженість і нездатність виявляти точку максимальної потужності за певних умов навантаження. Система також характеризується низькою швидкістю і інерційністю.

Для усунення наведених недоліків та підвищення швидкодії системи з метою відстеження точки максимальної потужності необхідно відійти від повільного методу широтно-імпульсної модуляції, робота якого характеризується повільним скануванням та стійкістю частоти роботи. Для цього складемо система, показану на рис. 3.9.



1 – детектор вхідного сигналу, 2 – множник, 3 – перемикач, 4 – логічний елемент «або», 5 – детектор досягнення максимального значення, 6 – детектор відсутності вхідного сигналу

Рисунок 3.9 – Система високошвидкісного контролера на базі ШІМ

Елементи схем характеризуються наступними властивостями:

- фотоелектричні елементи являють собою джерело напруги при найвищій частоті комутації системи,
- множник поєднує миттєві значення напруги та струму джерела – вихідний сигнал є пропорційним миттєвим значенням потужності джерела, таким чином, час відгуку цього елемента повинен бути сумісним з комутаційною частотою системи,
- детектор вхідного сигналу, який є пропорційним миттєвій потужності фотоелектричного модуля,
- детектор відсутності вхідного сигналу, який здатен генерувати вихідний сигнал у разі, коли період між вхідними сигналами аналізатор вхідного сигналу перевищує заданий час (2–3 мкс),

– перемикач, який призначено для зміни стану з кожним вхідним сигналом,

– навантаження повинно бути здатним поглинати максимальну потужність, що виробляється фотоелектричним модулем, що виступає у якості джерела, при визначеному значенні напруги U_{L1} , яка за значенням є нижчою від тієї, при якій джерело подає свою максимальну потужність, – U_{Pmax} .

Розглянемо роботу описаної системи: у початковий період часу система перебуває у стані спокою при напрузі розімкнутого ланцюга ($U_{вих.} = U_{C1}$) при розімкнутих вимикачах живлення. Детектор відсутності вхідного сигналу генерує імпульс, оскільки у стані спокою в системі відсутні сигнали і потужність джерела не змінна, – це призведе до включення перемикача і виникненні струму I_{SW} , який почне протікати з наростанням, яке залежить від $U_{вих.}$ і U_{L1} (для заданого значення індуктивності L_1). Внаслідок цих процесів, напруга на фотоелектричному модулі почне зменшуватися, а струм зростати.

Фактично «робоча точка» фотоелектричного модуля буде переміщуватися потужнісною характеристикою до точки максимальної потужності. Час, протягом якого відбувається зазначене, залежить від реактивних складових C_1 та L_1 й рівня напруги на цих елементах. Цей час шляхом підбору відповідних параметрів можна скоротити до десятих долей мкс.

У разі досягнення «робочою точкою» значення максимальної потужності і не припинення процесу керування, потужність фотоелектричного модуля починає падати. Коли $P_{фм}$ зменшується детектор вхідного сигналу генерує вихідний імпульс, який викликає зміну стану перемикача – вимикає його.

Струм, що протікає через індуктивність L_1 , не загальмовується, і заряджає конденсатор C_1 , а струм фотоелектричного модуля при ввімкненому вимикачі живлення заряджатиме конденсатор C_1 , що, у свою

чергу, призведе до зростання значення напруги розімкнутого контуру фотоелектричного модуля. Коли значення $U_{вих.}$ пройде точку максимальної потужності напруги, потужність джерела знову буде максимальною. При зменшенні потужності, детектор вхідного сигналу знову генерує вихідний імпульс. Цей імпульс призводить до вимикання перемикача і коливання навколо точки максимальної потужності продовжуються за наведеним вище алгоритмом.

Зазначений алгоритм роботи пристрою для настроювання на максимальне значення потужності дозволяє отримувати її від будь-якого джерела, незалежно від змін його характеристик у широкому діапазоні зміни напруг.

Функції захисту розглянутої системи повинні бути зорієнтовані на перезаряджанні акумуляторних батарей: обмеження напруги та струму заряду акумуляторів, температурний контроль, аварійне відключення акумулятора та інші. Ці захисти можна здійснити за допомогою логічних або мікропроцесорних пристроїв [40].

При роботі системи в режимі відстеження потужності, у якості елементів керування розподілом вихідного струму є перемикачі живлення блоку управління. Перемикач, через який протікає найбільший струм, вимикається, а вимкнення інших вимикаються у порядку зменшення вихідного струму. Це визначає робочий цикл окремих модулів для забезпечення управління у динаміці і вирівнювання значень вихідних струмів. Розподіл значень струмів допускається у визначених характеристикою елементів межах незалежно від коливань характеристик навантаження.

4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

З практичної точки зору, моделювання є одним з найефективнішим методом аналізу роботи, визначення недоліків та прогнозування поведінки теоретичних та реалізованих технічних об'єктів. У порівнянні з експериментальними способами, моделювання є більш гнучким, простим, доступним і дешевим способом дослідження параметрів взагалі, а у рамках даної роботи – фотоелектричних модулів і елементів електричної схеми перетворення.

Моделювання передбачає створення різних, у залежності від можливостей та наявних ресурсів, моделей: фізичної, статистичної, математичної та комп'ютерної.

Фізична модель дозволяє досліджувати процеси, що протікають у модулях при продукуванні електричної енергії у напівпровідниковому елементі під дією сонячного випромінювання, вплив властивостей застосованого матеріалу на вихідні характеристики. Дана модель вимагає знання параметрів і складу напівпровідникового елемента – наявність, концентрація і склад домішок, рухливість носіїв заряду, спектральний склад сонячного випромінювання впродовж визначеного періоду. З огляду на це, дана модель є досить складною для її створення, дослідження та аналізу.

Створення статистичної моделі базується на використанні доступних із загальних джерел інформації результатів дослідів у цікавій для нас царині, даних, отриманих на основі проведення натурних досліджень. Розглянутий масив даних піддається обробці та аналізу методами математичної статистики та теорії ймовірностей. Недолік даних моделей полягає у необхідності здійснення значного числа експериментів та необхідності застосування високотехнологічних засобів вимірювання.

Для покращення результатів дослідження необхідно застосування прогресивних методів наукового пошуку, а саме – створення комп'ютерних моделей. Сучасні програмні комплекси для імітаційного моделювання електротехнічних систем є досить актуальні до застосування. Створені моделі дозволяють здійснювати порівняльний аналіз розроблених варіантів побудованих систем, а також здійснювати оптимізацію параметрів та режимів їх роботи.

Створення моделей вимагає знань про наявні технічні характеристики сонячних модулів – напруга холостого ходу та струм короткого замикання. Базові параметри для моделювання вказуються виробником у паспорті на фотоелектричний модуль. А результатом буде сімейство енергетичних та вольт-амперних характеристик фотоелектричного модуля за різних рівнях освітленості та температури зовнішнього повітря.

Фотоелектричні панелі складаються з великого числа окремих фотоелектричних елементів, що можуть бути з'єднані послідовно та паралельно для забезпечення заданих значень напруги і струму. Самі фотоелектричні елементи працюють на основі внутрішнього фотоефекту, завдяки якому здійснюється перетворення енергії сонячного випромінювання у електричну енергію.

При моделюванні характеристик фотоелектричних модулів вирішення таких завдань, як оптимізація схеми, визначення «робочої точки» за різних умов освітленості і температури, визначення впливу часткового затінення, аналіз і прогноз параметрів роботи. Найбільшого впливу на характеристики роботи фотоелектричного модуля мають послідовний опір та температура – чим менше їхня величина, тим вищий коефіцієнт корисної дії і більше потужність, що виробляється модулем.

Побудова імітаційної моделі фотоелектричного модуля виконуємо у програмному середовищі Matlab/Simulink [44].

Підсистемна програма Simulink – це додаток до програмного пакету Matlab. Моделюванні за допомогою Simulink реалізує принцип візуального

програмування, у відповідності з яким, дослідник використовує бібліотеку стандартних блоків і створює на екрані ПК модель пристрою та проводить відповідні розрахунки. Основу Simulink складають такі мови програмування Ada і C ++ [44].

За допомогою інтерфейсу Matlab можна створити та описати будь-який складний елемент чи структуру. Вхідні параметри моделі можна задавати за допомогою стандартних блоків, що описують визначені рівні сигналів. Напруга вводиться за допомогою блоку, що формує монотонно зростаючий або спадаючий сигнал.

Створена модель (рис. 4.1) дозволяє реєструвати основні характеристики фотоелектричного модуля [45].

Вхідний модуль являє собою основний блок перетворення потужності системи світла фотоелектричним модулем, вихідна характеристика якого залежить від сонячного випромінювання та температури. Вхідний модуль має нелінійні характеристики і вимагає проведення моделювання для будови відповідних характеристик та моделювання відстеження точки максимальної потужності фотоелектричної системи.

Фотоелектричний модуль має нелінійну вольт-амперну характеристику, яку можна змоделювати за допомогою джерел струму, діодів та резистивних елементів, що є стандартними елементами програмного середовища Matlab, і досить точно імітують характеристики першого [45].

На початку формуємо синусоїдну вихідну напругу інвертора з широтно-імпульсним регулюванням напруги, що дозволяє забезпечити точність підтримки вихідної напруги $U_{вих.}$ на рівні 3% і коефіцієнта гармонік k_2 менше 5% при зміні величини навантаження.

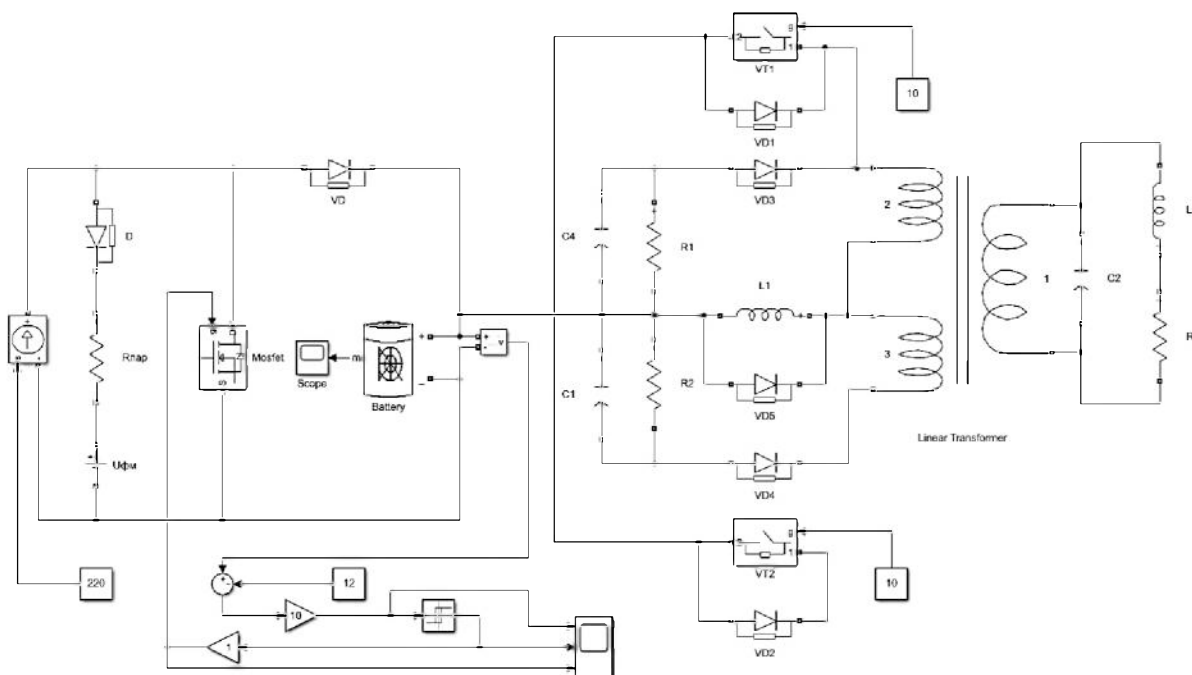


Рисунок 4.1 – Модель фотоелектричної станції автономного живлення

Наступним кроком є вибір напруги акумуляторних батарей на основі наступних даних: відсутність перенапруг, параметри перетворюючого трансформатора, значення зворотних струмів через діоди і форма вихідної напруги. У схемі здійснюється перетворення постійної напруги акумуляторної батареї 12 В у змінну напругу 220 В з частотою 50 Гц, що має синусоїдну формою із зазначеними параметрами.

Модель фотоелектричного модуля містить кероване джерело струму, приєднаного до акумуляторної батареї через розділовий діод.

Для заряджання акумуляторної батареї до її ланцюга необхідно включати контролер, що виключить перезаряджання перших. При заряджанні акумулятора до визначеної величини напруги здійснюється підключення навантажувального транзистора Mosfit, який поглинає надлишкову електричну потужність фотоелектричного модуля.

Узгодження характеристик фотоелектричного модуля і акумуляторної батареї по напрузі у ТМП досягається рівністю максимальної напруги заряджання [46].

Для підвищення низьковольтного значення напруги акумуляторної батареї з 14 В до 220 В застосовано силовий трансформатор (Linear Transformer) з коефіцієнтом трансформації 20. Інвертор засновано на принципі широтно-імпульсної модуляції прямокутної форми вихідної напруги з частотою 50 Гц.

Для отримання синусоїдної форми напруги на навантаженні застосовано паралельний резонансний LC-контур, підключений до інвертора.

Індуктивність L_1 згладжує струм інвертора та дозволяє отримати значення коефіцієнта потужності на рівні 0,85. Трансформатор з підключеним паралельно конденсатором C_2 утворюють резонансний контур. Імпульси управління формуються таким чином, щоб у найбільш ефективний спосіб наблизити форму вихідної напруги і струму до синусоїдної форми.

Результати моделювання представлено на рис. 4.2 – 4.8.

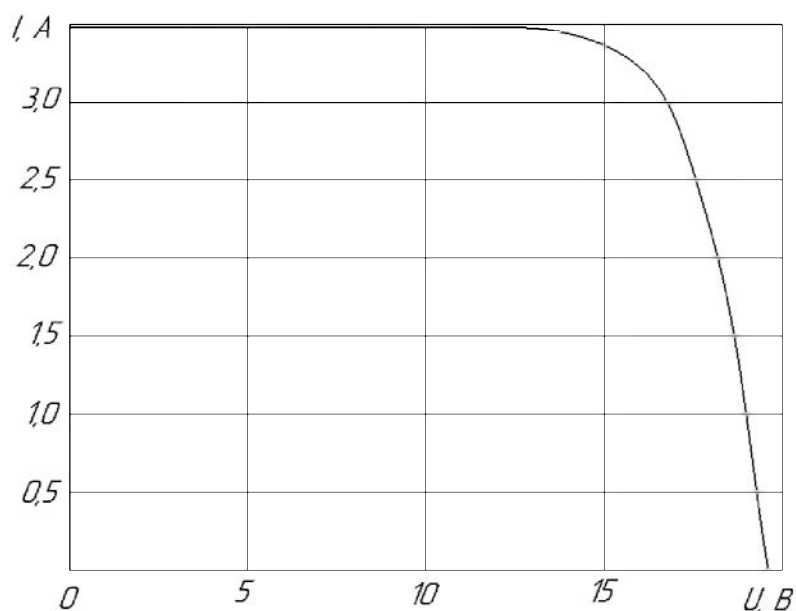


Рисунок 4.2 – Вольт-амперна характеристика фотоелектричного модуля

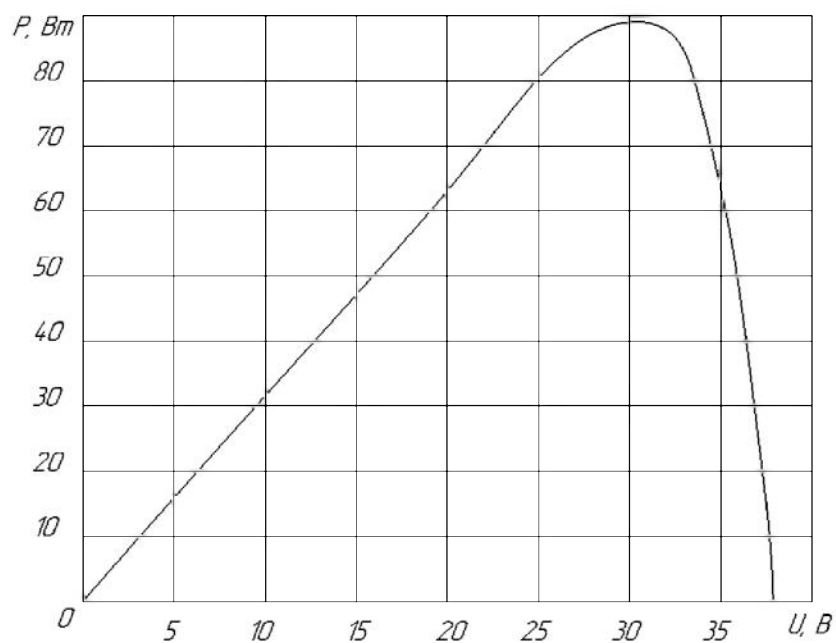


Рисунок 4.3 – Енергетична характеристика фотоелектричного модуля

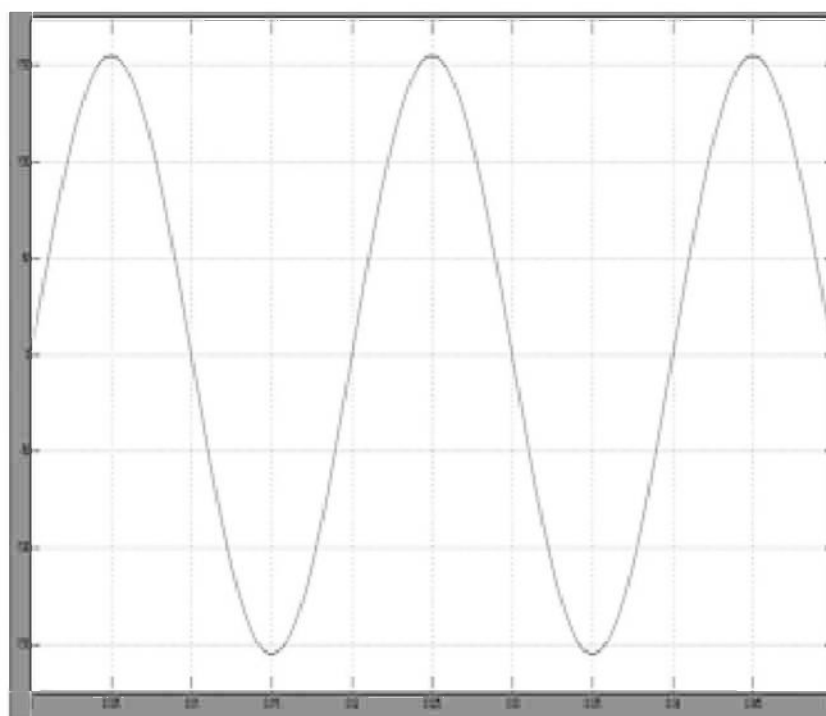


Рисунок 4.4 – Струм на навантаженні

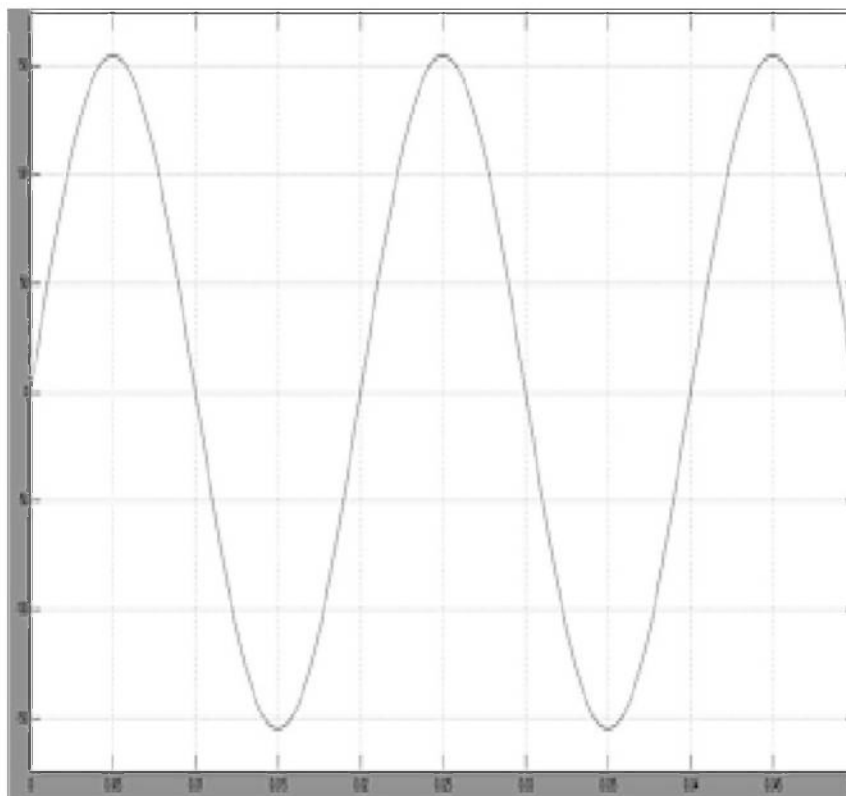


Рисунок 4.5 – Напруга на навантаженні

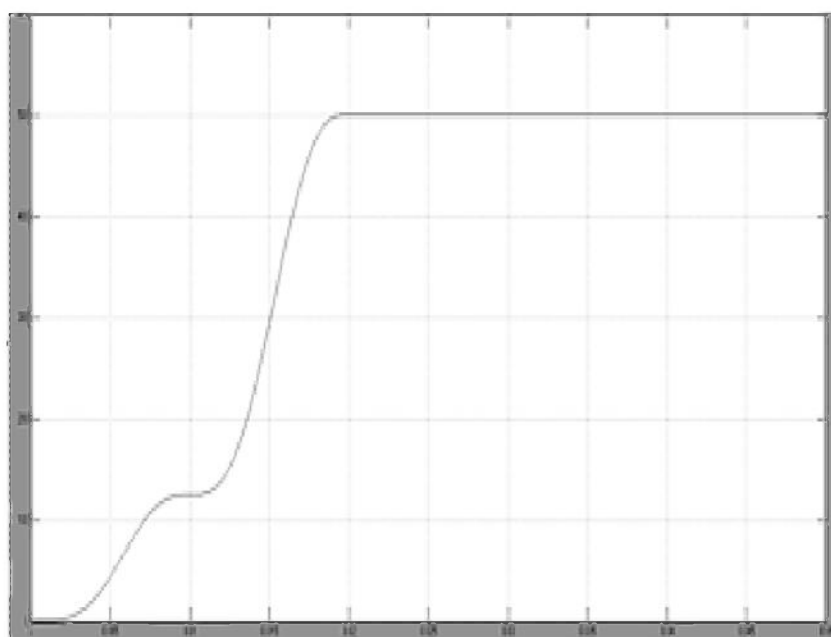


Рисунок 4.6 – Зміна активної потужності та навантаженні

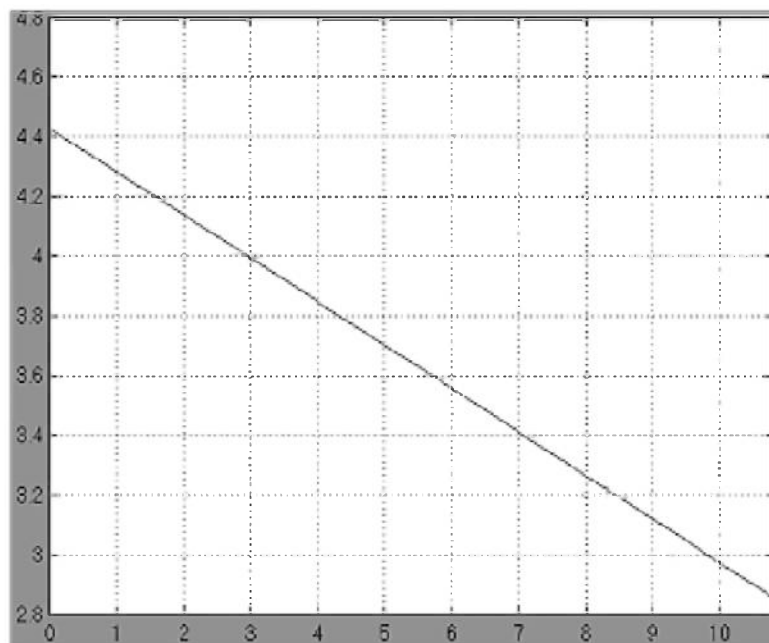


Рисунок 4.7 – Зміна максимальної потужності у функції часу в умовах лінійно спадаючої освітленості

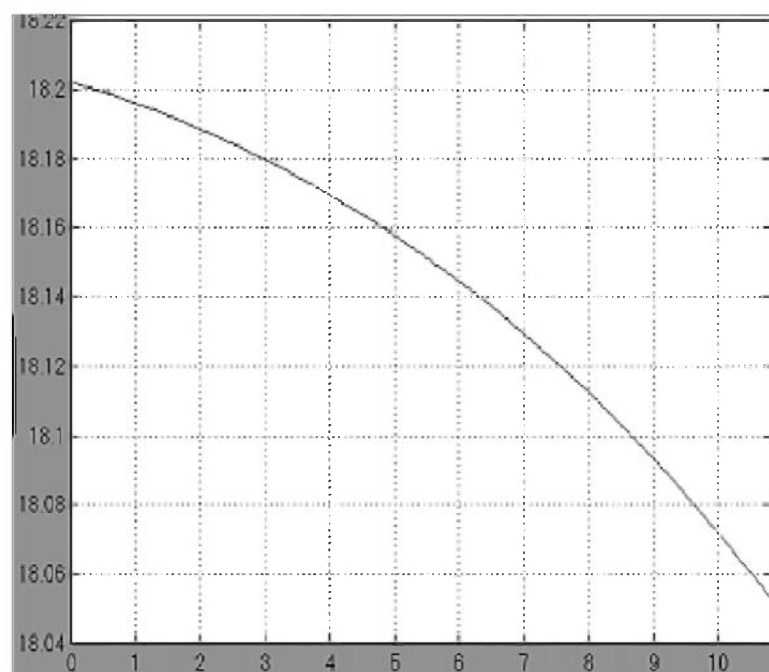


Рисунок 4.8 – Зміна коефіцієнту корисної дії як функції часу в умовах лінійно спадаючої освітленості

ВИСНОВКИ

У роботі було здійснено опис та детальний аналіз впливу сонячної інсоляції та зовнішньої температури на вигляд енергетичних та воль-амперних характеристик фотоелектричних модулів за допомогою моделювання у програмному середовищі Matlab.

У роботі проаналізовано можливості моделювання фотоелектричних систем, властивості систем пошуку точки максимальної потужності і була розроблена концепція для забезпечення широкого застосовування даної системи. Результати моделювання продемонстрували можливість використання даної концепції для будь-якої фотоелектричної системи, є репрезентативними та достатньо оптимізованими з точки зору конфігурації.

При складанні схеми було враховано, що наявні перехідні процеси у підключених до системи навантаженнях та нелінійність характеристик окремих елементів дозволяють з однаковим ступенем точності відстежувати точку максимальної потужності фотоелектричних модулів. Ця процедура здійснюється з високою швидкістю, а робота система на цьому режимі підтримується тривалий час.

Відстеження точки максимальної потужності при різних умовах опромінення та температурному режимі було здійснено за допомогою розробленого контролера, який використовував специфічний алгоритм, який з високим ступенем точності стабілізував робочу фотоелектричного модуля навколо ТМП. Моделювання також показало можливості інвертора для перетворення та регулювання напруги з отриманням синусоїдної її форми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бурячок Т.А. Електроенергетика та охорона навколишнього середовища. Функціонування енергетики в сучасному світі / Т.А.Бурячок, В.Н.Кліменко, Ю.А.Ландау, І.Я.Сігал // Енергетика: історія, сьогодення і майбутнє. – К.: Оптима, 2011. – 391 с.
2. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Проект оновленої «Енергетичної стратегії України на період до 2030 року». – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>
3. Щербина О.М. Енергія для всіх: технічний довідник з енергоощадності та відновних джерел енергії / О. Щербина. – Ужгород: Вид. В. Падяка, 2007. – 340 с.
4. Ахмедов Р.Б. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Р.Б. Ахмедов. – М.: Знание, 1988. – 218 с.
5. J. Fricke, W.L. Borst, Essentials of Energy Technology: Sources, Transport, Storage, Conservation, Wiley, 2013.
6. Iqbal M, An Introduction to Solar Radiation, Academic Press, Ontario (1983).
7. Palz W, Greif J, European Solar Radiation Atlas, Commission of the European Communities, Ed Springer, Germany. 1996.
8. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://surl.li/ppje>
9. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293735/4293735532.htm>
10. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика: учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 276 с.
11. Мак-Вейг Д. Применение солнечной энергии / Д. Мак-Вейг ; пер. с англ. Г. А. Гухман ; ред. Б. В. Тарнижевский. – М. : Энергоиздат, 1981. – 212 с.

12. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. // Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. – Л.: Наука, 1989. – 310 с.
13. Адаменко О.М., Височанський В., Лютко В., Михайлів М. Альтернативні палива та інші нетрадиційні джерела енергії. Монографія. – Івано-Франківськ:ІМЕ, 2001. – 432с.
14. Ахмедов Р.Б., Баум И.В., Пожарнов В.А., Чаховский В.М. Солнечные электрические станции. — М.: ВИНТИ, 1986. — Т. 1. — 120 с.
15. Системи акумулювання і перетворення енергії відновлювальних джерел: дис... д-ра техн. наук: 05.14.08 / Кудря Степан Олександрович ; НАН України, Інститут електродинаміки. – К., 1996. – 549 с.
16. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://studref.com/458886/tehnika/struktura_sostav_oborudovaniya_fotoelektrostantsiy
17. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки / Н.В. Харченко – М.: Энергоатомиздат, 1991.
18. W.C.H. Choy (Ed.), Organic Solar Cells Materials and Device Physics, 2013.
19. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sovet-ingenera.com/eco-energy/sun/princip-raboty-solnechnoj-batarei.html>
20. Сердюк В.В., Чемересюк Г.Г., Терек М. Фотоэлектрические процессы в полупроводниках. Киев-Одесса: Вища школа, 1982.
21. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/lcd/tech/ltps.htm>
22. Рейкви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / пер. с англ. В.В. Высоцкой и др.; под ред. С.Н. Горина. М.: Мир, 1984.
23. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://fizika.dp.ua/%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0-4-3/>
24. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://vzaemodiqsvitla.blogspot.com/2011/01/22.html>

25. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 т. / пер. с англ. В.А. Гергеля, В.В. Ракитина; под ред. Р.А. Суриса. М.: Мир, 1984. Т. 2.
26. Chapin D.M. et al. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power // J. Appl. Phys. 1954. Vol. 25, No. 5. P. 676-677.
27. Фонаш С. и др. Современные проблемы полупроводниковой фотоэнергетики / под ред. Т. Коутса, Дж. Микина. М.: Мир, 1988.
28. Надежность систем электроснабжения / В. В. Зорин [и др.]. – Киев : Вища шк. Головное изд-во, 1984. – 192 с.
29. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: в 2 т. / Под общ. ред. А.А.Федорова. Т.2. Электрооборудование. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
30. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях – Киев: Наукова думка, 1985. – 268 с.
31. Основы теории надежности систем электроснабжения/В.В. Карпов, В.К. Федоров, В.К. Грунин, Д.С. Осипов. – Омск: ОмГТУ, 2003. – 72 с.
32. Дудюк Д.Л. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навчальний посібник / Д.Л. Дудюк, С.С. Мазепа, Я.М. Гнатишин. – Львів: Магнолія 2006. – 2008. – 188 с.
33. Атлас енергетичного потенціалу відновлених та нетрадиційних джерел енергії. – К.: Изд. Института возобновляемой энергетики НАН Украины, 2005. – 44 с.
34. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://energystorage.com.ua/tovary/energy-storage-syl-500-kvt-1048-kvt-ch-2/>
35. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://surl.li/qgsr>
36. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electrokaprizam.net/akkumuljatory-dlya-ibp/726-everexceed-st-12300.html>

37. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://arduinka.biz.ua/uk/kontroler-zaryadu-12v-akumulyatorno-batare-Xh-M601-p863c79.html>

38. Кожем'яко В.П. Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики / В. П. Кожем'яко, В. Г. Домбровський, В. Ф. Жердецький, В. І. Маліновський, Г. В. Притуляк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. - 2011. – № 2. – С. 142-157. – Режим доступу:
http://nbuv.gov.ua/UJRN/oeiet_2011_2_20

39. Патон Б. Є. Умови ефективного застосування сонячних електроенергетичних систем / Б.Є. Патон, М.І. Ключ, О.Є. Коротинський, А.В. Макаров, Ю.О. Трубіцин // Вісник НАН України. – 2012. – № 3. – С. 48–58.

40. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: теория и эксперимент / пер. с англ. под ред. М.М. Колтуна. М.: Энергоатомиздат, 1987.

41. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: Пер. с англ. Под ред. М.М.Колтуна. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 195 с.

42. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. // Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. – Л.: Наука, 1989. – 310 с.

43. Каргиев В.М. КПД солнечных элементов и модулей.//Возобновляемая энергия. – 1998. – № 2. – с. 23.

44. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

45. Ярмухаметов У.Р. Имитационное моделирование режимов работы солнечных установок с фотоэлектрическими преобразователями в зависимости от внутренних и внешних факторов в среде MATLAB/Simulink / У. Р. Ярмухаметов, А.Т. Ахметшин // Вестник

Красноярского государственного аграрного университета, 2014. – №8. – С.195-200.

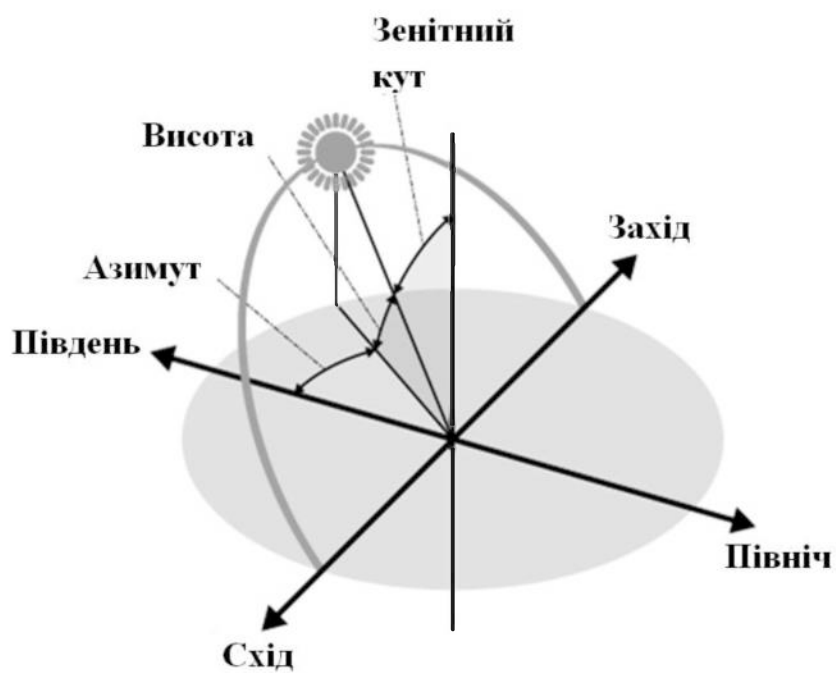
46. Петухов О.А. Моделирование: системное, имитационное, аналитическое: учеб. пособие / О. А. Петухов, А. В. Морозов, Е. О. Петухова. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008. – 288 с.

47. Справочник по электроустановкам высокого напряжения. /Под ред. Баумштейна И.А. и Хомякова В.М. – М.: Энергия, 1981. – 656 с.

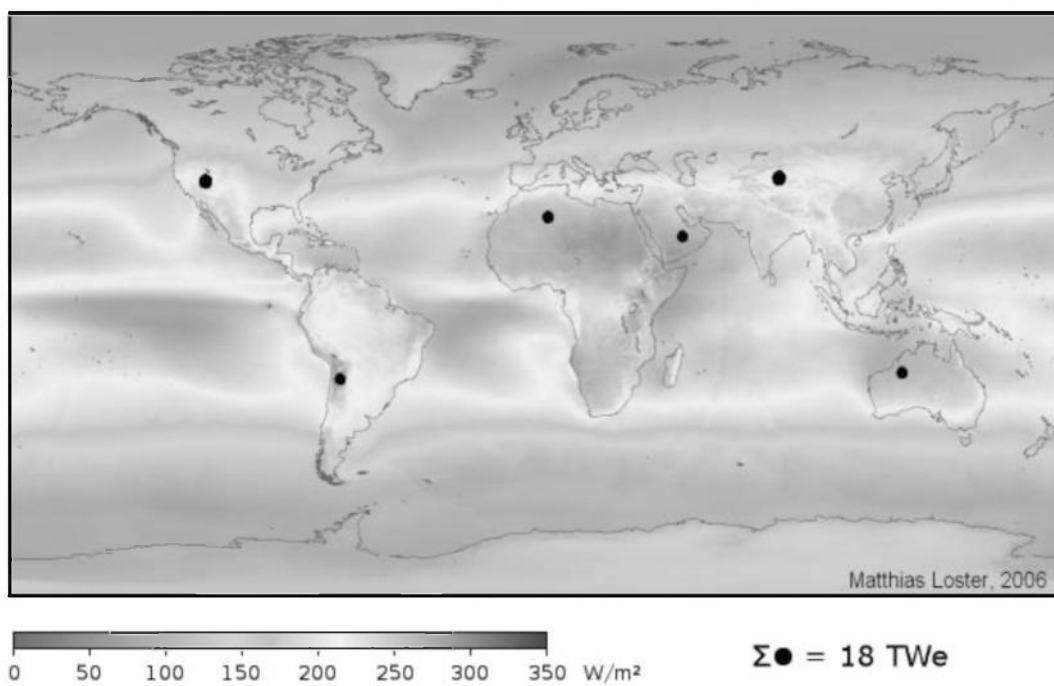
48. Правила безопасной эксплуатации энергоустановок. – Киев, 1998. – 142 с.

49. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.

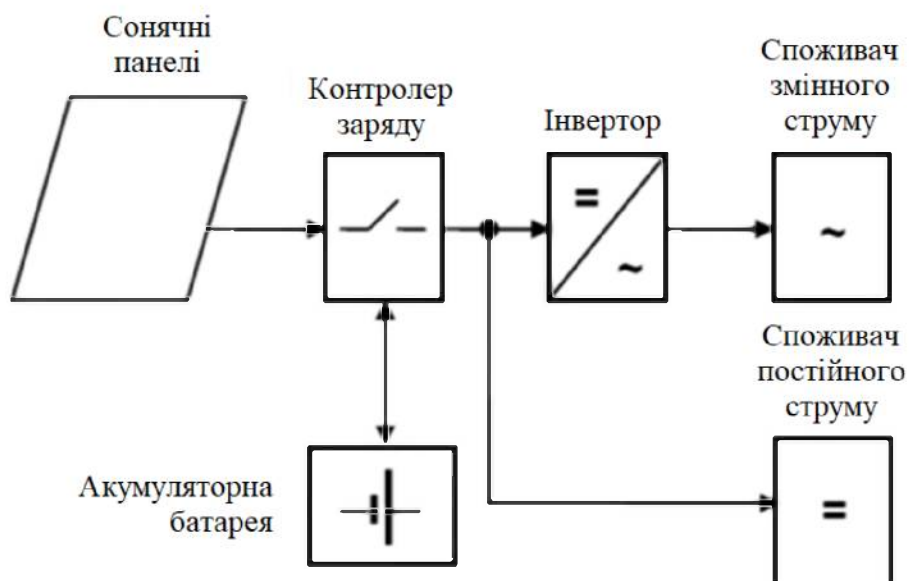
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



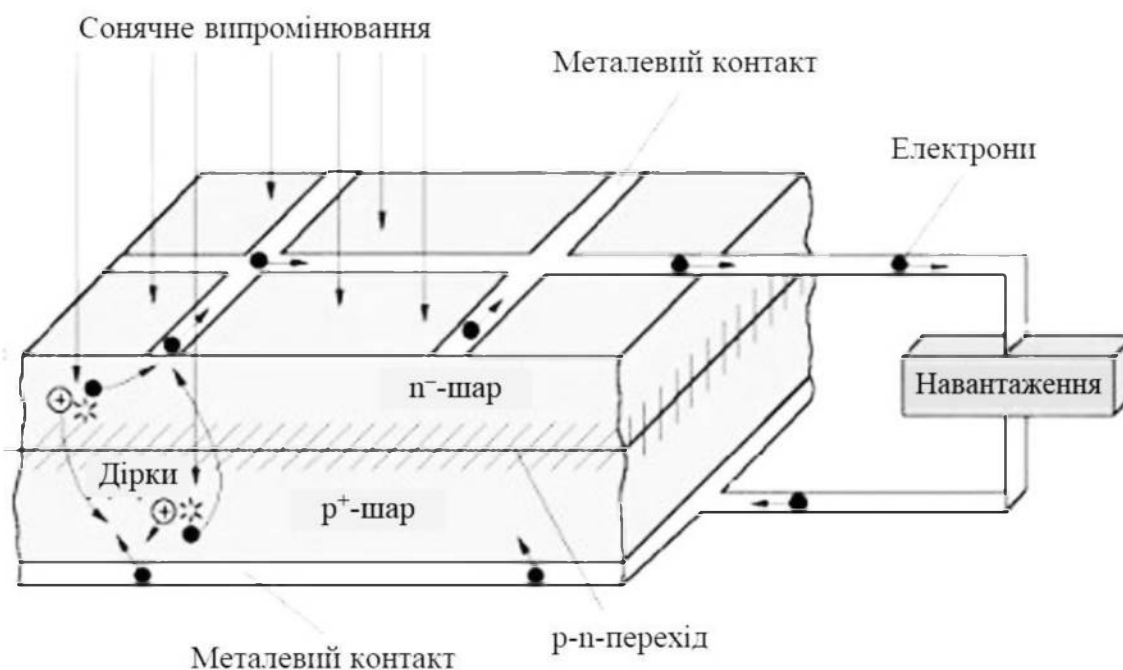
Визначення положення Сонця на небосхилі



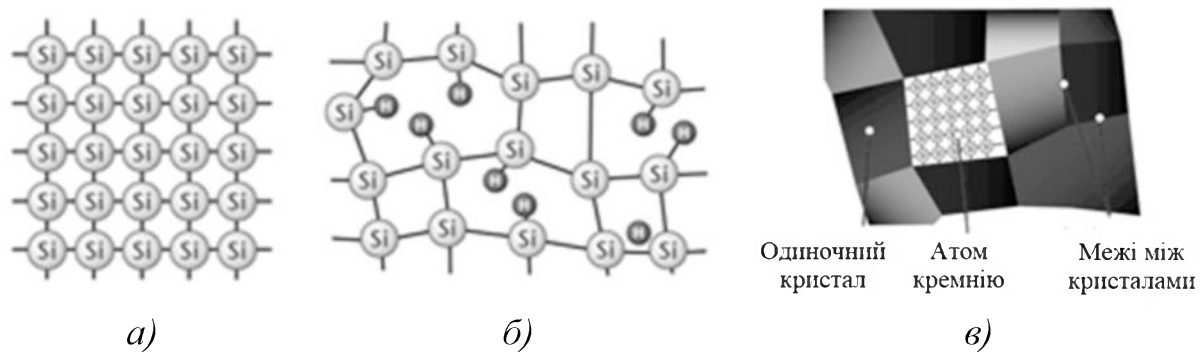
Рівень сонячної інсоляції по світу



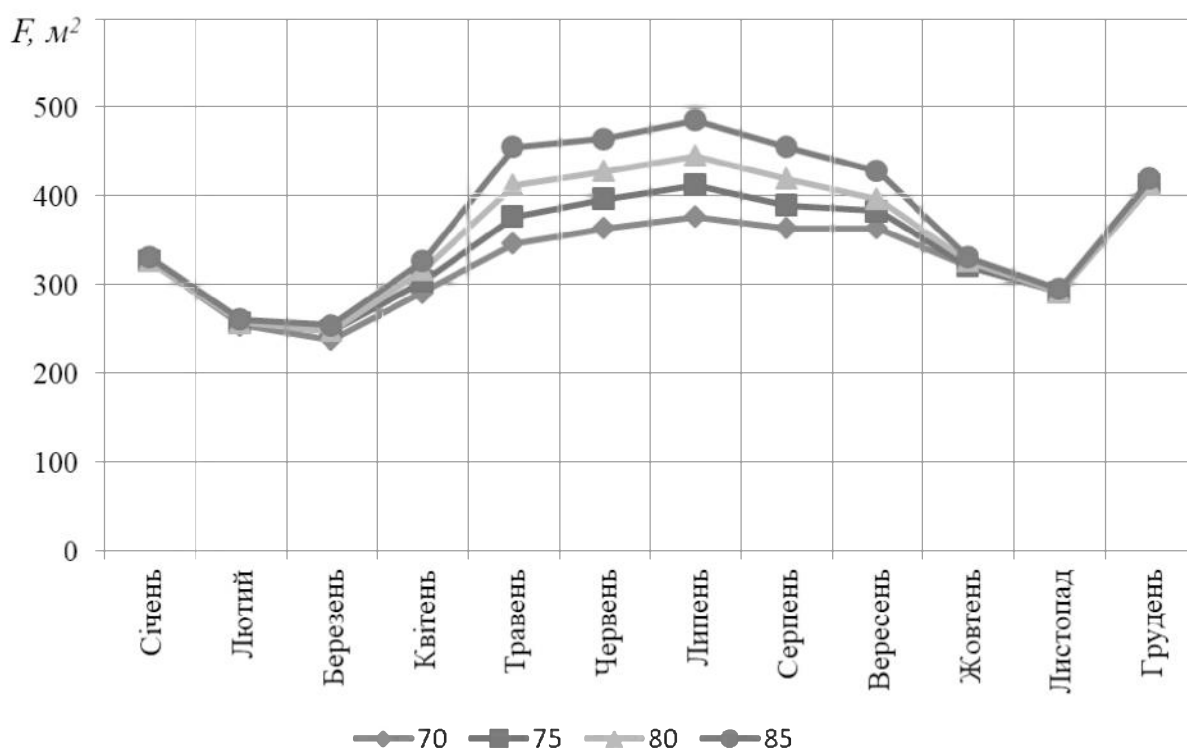
1 – фотоелектричний масив, 2 – контролер, 3 – акумуляторні батареї,
4 – струмовий інвертор, 5 – з'єднувальна мережа
Схематичне зображення фотоелектричної системи



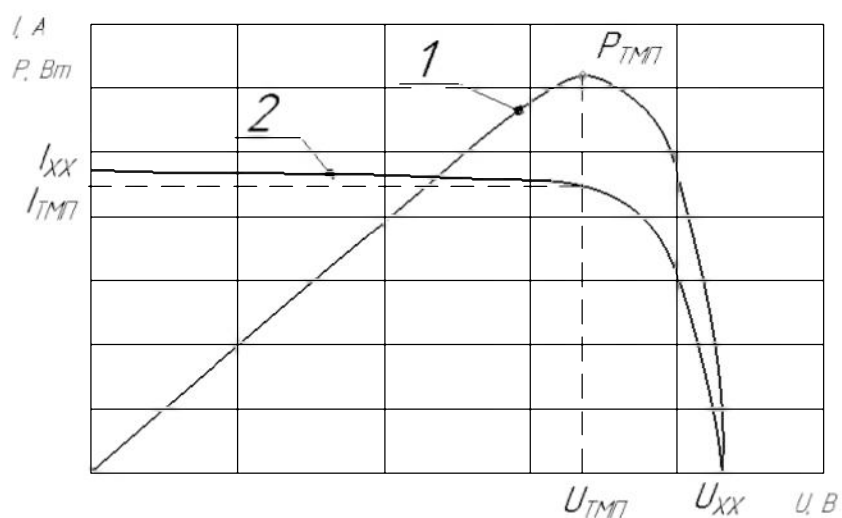
Принцип дії кремнієвої сонячної батареї



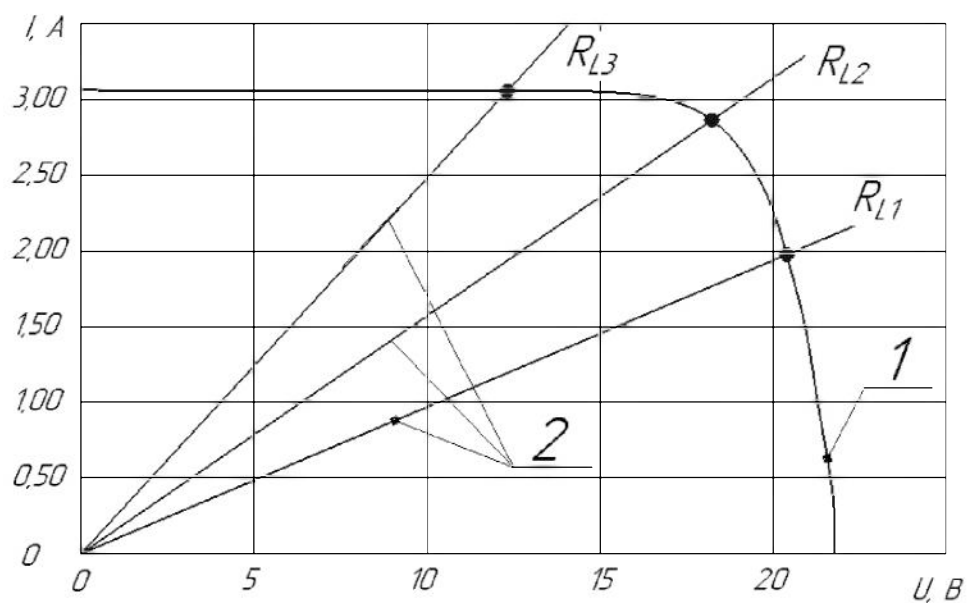
Структури однокристалного (а), аморфного (б) та полікристалічного (в) кремнію



Графічні залежності для визначення необхідної площі фотоелектричного поля

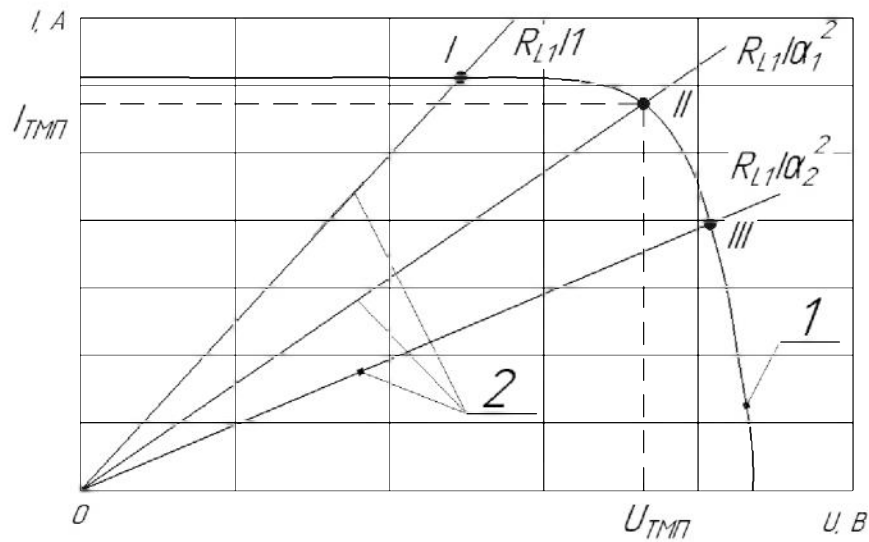


Спільний розгляд енергетичної (1) і вольт-амперної характеристики (2) фотоелектричного модуля



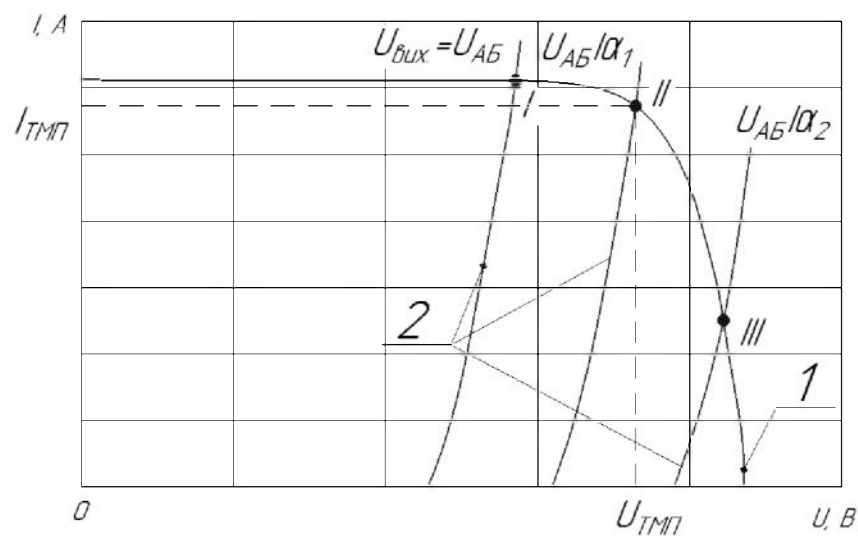
1 – характеристика фотоелектричного модуля, 2 – характеристика навантаження

Зміна положення «робочої точки» при зміні опорів навантаженням



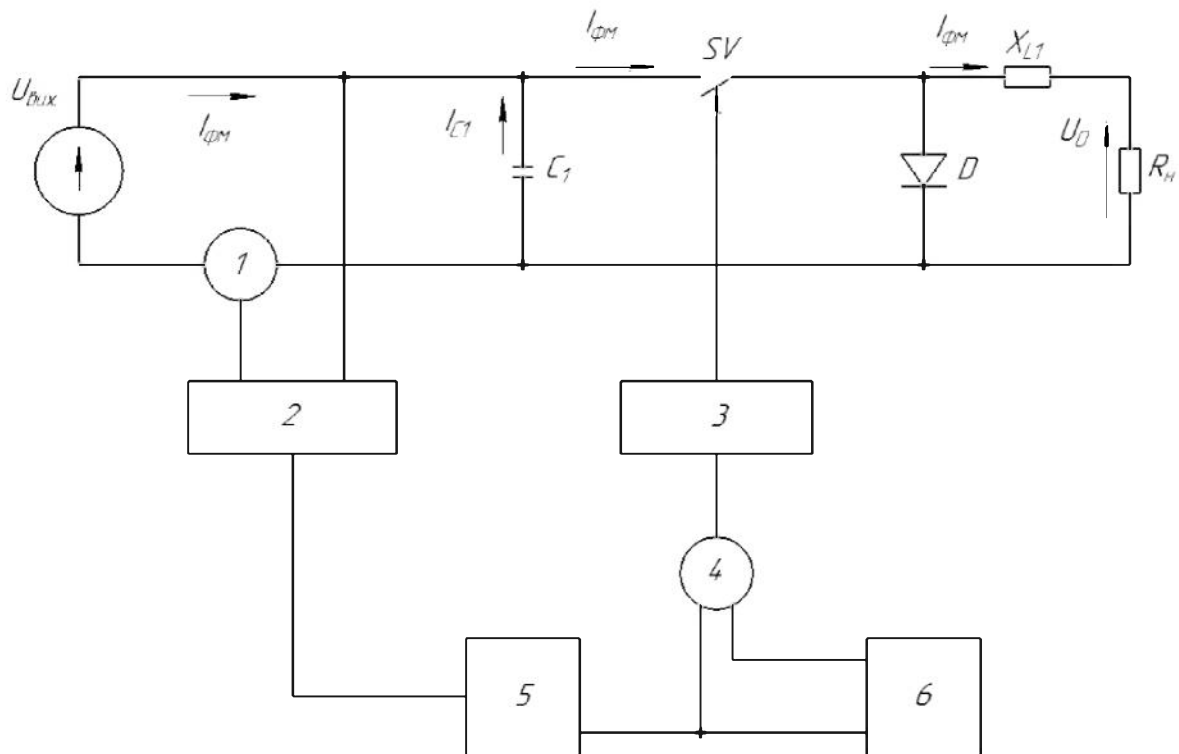
1 – характеристика фотоелектричного модуля, 2 – характеристика навантаження (I, III – робочі точки навколо ТМП, II – ТМП)

ШІМ-керування ефективною лінією навантаження



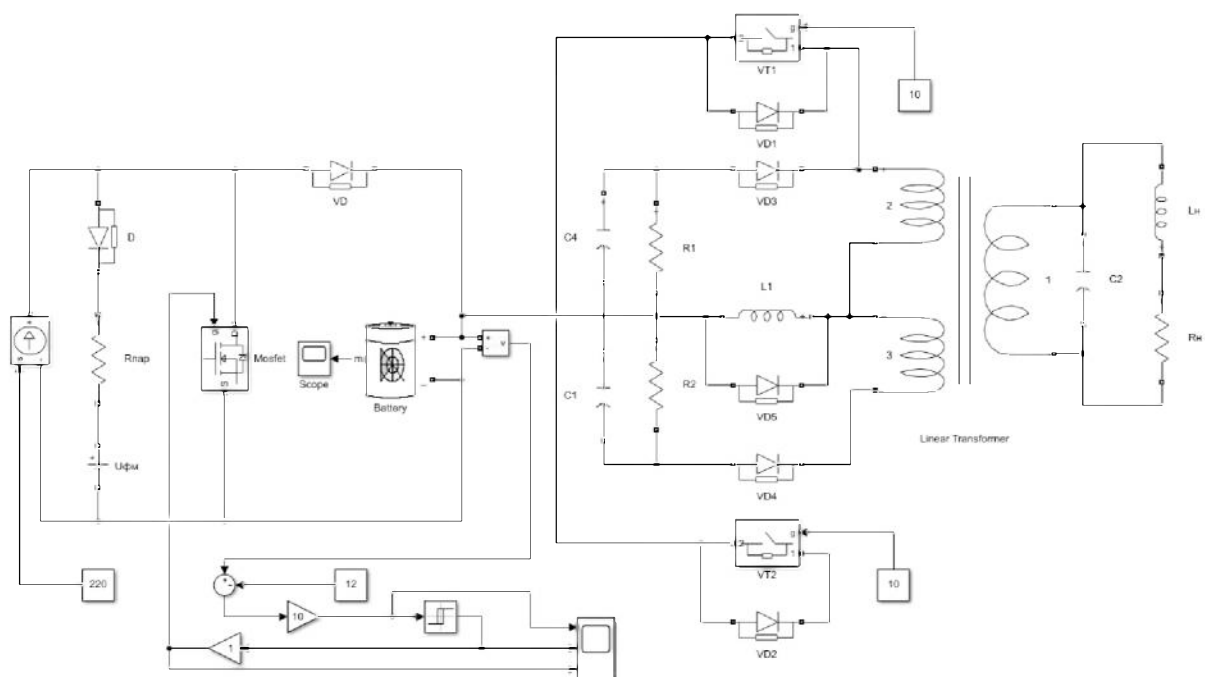
1 – характеристика фотоелектричного модуля, 2 – характеристика акумуляторних батарей (I, III – робочі точки навколо ТМП, II – ТМП)

ШІМ-керування навантажувальної лінії типу акумулятора

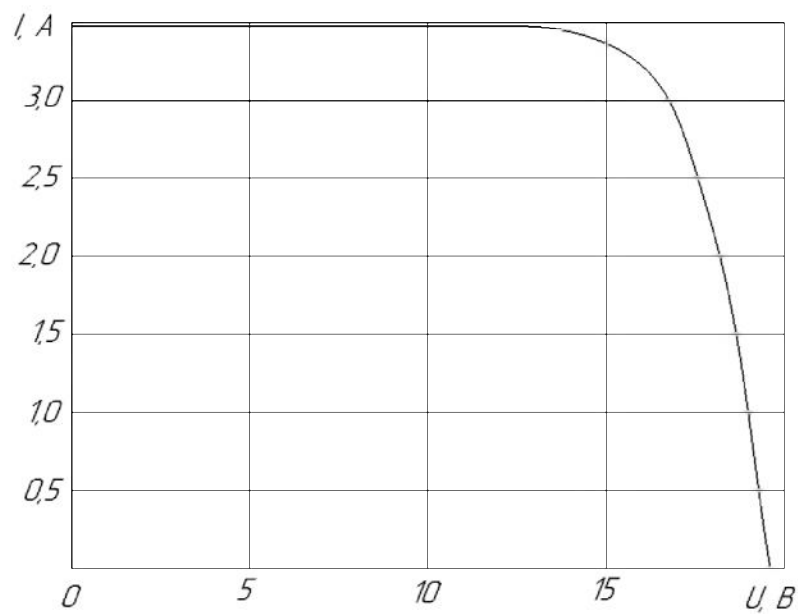


1 – детектор входного сигнала, 2 – множник, 3 – переключач, 4 – логічний елемент «або», 5 – детектор досягнення максимального значення,
6 – детектор відсутності входного сигналу

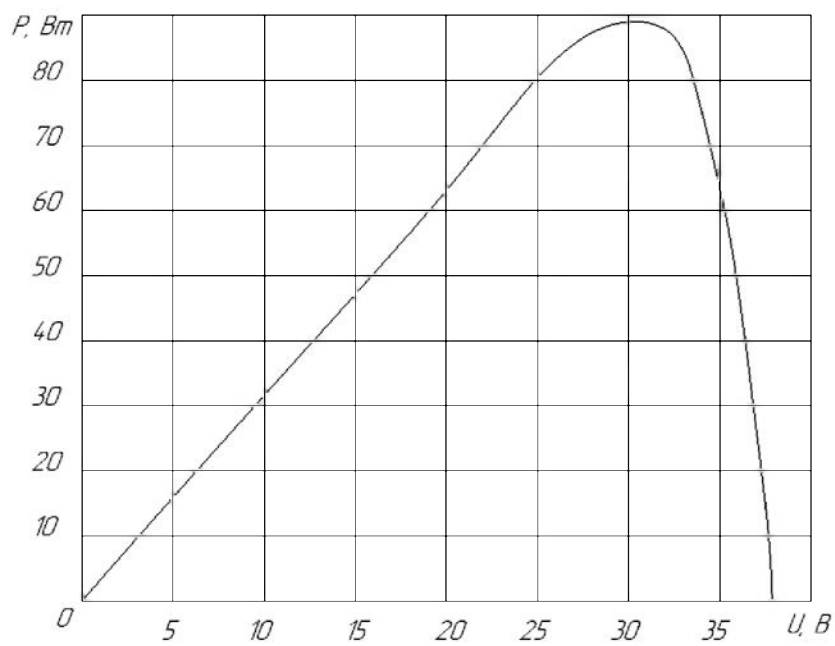
Система високошвидкісного контролера на базі ШІМ



Модель фотоелектричної станції автономного живлення



Вольт-амперна характеристика фотоелектричного модуля



Енергетична характеристика фотоелектричного модуля

ДОДАТОК Б. ОГЛЯД ПИТАНЬ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

На електротехнічний оперативно-ремонтний персонал, який обслуговує електрообладнання сонячних станцій, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори за ГОСТ 12.0.003-74:

фізичні:

- підвищена та понижена температура повітря робочої зони;
- підвищена та понижена температура поверхонь обладнання,

матеріалів;

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- недостатнє освітлення робочої зони;
- нестача природного освітлення;
- небезпечний рівень напруги електричного кола, замикання якого

може

відбутися через тіло людини;

- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищена та понижена вологість повітря;
- підвищена та знижена рухливість повітря;
- психофізіологічні:
- фізичні перевантаження (динамічні);
- нервово - психічні перевантаження (монотонність праці,

перенапруга аналізаторів).

Живлення системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Категорія умов по небезпеці електротравматизму – підвищеної небезпеки, у зв'язку з наявністю струмопровідної підлоги. Технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмовідними елементами електроустаткування, необхідно:

- розміщувати неізольовані струмовідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах;
- використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки;
- підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

2) При живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі.

Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника.

3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

Роботи по обслуговуванню електрообладнання.

При роботі, яка зв'язана з доторканням до струмоведучих частин електрообладнання, необхідно на його пусковому пристрої або ключі керування повісити плакат "НЕ ВМИКАТИ, ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ".

Відключене положення комутаційних апаратів до 1000 В з недоступними для огляду контактами (автоматичні вимикачі, пакетні вимикачі, рубильники в закритому виконанні тощо) визначається перевіркою відсутності на їх затискачах або на відходячих шинах, проводах або затискачах обладнання, яке відключається цими комутаційними апаратами. В електроустановках до 1000 В при роботах на збірних шинах РУ, щитів, збірок напруга з шин повинна бути знята та шини (за винятком шин, які виконані ізолюваним проводом) повинні бути заземлені. Необхідність та можливість встановлення на приєднання цих РУ, щитів, збірок та підключеного до них обладнання визначає працівник, який видає розпорядження.

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні встановлюють допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення.

Таблиця Б.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт Па.

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості	17-29	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний		15-24	До 75%	не більше 0,3

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено:

1. Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої

зони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні оптимальних параметрів мікроклімату не повинні бути більше ніж на 2°C за діапазон норм.

2. Якщо температура поверхонь вище або нижче оптимальної температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше їм.

3. Для забезпечення нормованих значень руху кисню проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

Робочою зоною вважається простір, який обмежений огорожуючими конструкціями виробничих приміщень, що мають висоту 2 м над рівнем підлоги або площини, на яких знаходяться місця постійного або непостійного перебування працюючих. Склад повітря робочої зони залежить від складу атмосферного повітря і впливу на нього ряду шкідливих виробничих факторів, утворених в процесі трудової діяльності людини. Склад повітря залишається постійним. Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³.

Таблиця Б.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця. Нагромадження пилу вказує на необхідність у вживанні заходів по очищенню від нього. Тому необхідно здійснювати наступні заходи:

- очищувати пил якнайчастіше.
- щодня протирати гарячі поверхні.

Планувати прибирання так щоб вони приходилось на час, коли устаткування виключене, як, наприклад, у другу половину дня п'ятниці або на вихідні.

Природне освітлення

В залежності від джерела світла промислове освітлення поділяється на: - природне освітлення - освітленість приміщень світлом неба (прямого або відображеного), яке проникає через світлові пройми в зовнішніх огорожених конструкціях. По своєму спектральному складу воно є найбільш сприятливим. Природне освітлення характеризується коефіцієнтом природної освітленості КПО (e_n). КПО - відношення природного освітлення, яке створюється в деякій точці заданої площини всередині приміщення світлом неба, до значення зовнішньої горизонтальної освітленості.

КЕО при природному та суміщеному освітленню.

Характеристика зорової роботи при виконанні - роботи високої точності;

Розряд - III;

Підрозряд зорової роботи - б;

Контраст об'єкту розпізнавання - середній;

Характеристика фону - темний;

Бокове КЕО, %:

- природне 2,0;

- суміщене 1,2.

Основною величиною для розрахунку і нормування природного освітлення є коефіцієнт природної освітленості (КПО). Прийняте роздільне нормування КЕО для бічного і верхнього освітлення. Ті місця, що освітлюється тільки бічним світлом, нормується мінімальне значення КЕО в межах робочої зони, що повинно бути забезпечене в точках, найбільше віддалених від вікна. Нормовані значення КЕО для будинків визначаються за формулою:

$$e_n = e_n \cdot m_n, \quad (Б.1)$$

де e_n – значення КЕО для будинків;

t_n – коефіцієнт сонячності клімату - 0,85, вікна зорієнтовані на захід.

Природне: $e_n = 2,0 \cdot 0,85 = 1,7\%$,

Суміщене: $e_n = 1,2 \cdot 0,85 = 1,0\%$.

Штучне освітлення.

- штучне освітлення використовується двох систем: загальне або комбіноване. Загальне освітлення - освітлення, при якому світильники розміщуються у верхній зоні приміщення рівномірно або пристосувальне до розташування обладнання. Комбіноване освітлення - додаткове освітлення, при якому до загального освітлення додається ще й місцеве. Місьцеве освітлення - освітлення, яке створюється світильниками, які концентрують світловий потік безпосередньо на робочих місцях.

Штучне освітлення, лк: загальне - 300 лк; комбіноване – 1000 лк.

Для забезпечення нормативного значення e_{min} передбачено.

Приміщення сонячної станції відноситься до категорії Д – негорючі речовини у холодному стані з зонами П-I (місця встановлення трансформаторів), де застосовуються горючі рідини з температурою спалаху більше 61 °С.

Будівлі сонячної станції характеризуються III ступенем вогнестійкості.

До III ступенем вогнестійкості відносяться будівлі з штучними та захисними конструкціями з природних та штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриття допускається застосування дерев'яних інструкцій, захищених штукатуркою або важкогорючими листовими, а також нитковими матеріалами. До елементів покриття висуваються вимога по межах огнестійкості та межах розповсюдження полум'я; при цьому елементи укриття з деревини піддаються вогнезахисній обробці.

Межі вогнестійкості занесені у таблицю Б.3

У чисельнику вказуються межі вогнестійкості будівельних конструкцій; у знаменнику - межі розповсюдження полум'я по них.

Таблиця Б.3 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій і максимальні межі розповсюдження полум'я по них

Ступінь вогнестійкості будівлі	Стіни				Колони	Сходові площадки, балки, косоури, марші сходових кліток	Плити, настили (з утеплювачем), несучі конструкції перекриття	Елементи перекриття	
	Несучі	Самонесучі	Зовнішні несучі	Внутрішні несучі (перегородки)				Плити, настили, прогони	Балки, ферми, арки, рами
III	1/0	0,5/0	0,2/40	0,2/40	0,25/0	1/0	0,25/0	0,25/25	0,25/0

У табл. Б.4 приведені протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх огнестійкості.

Таблиця Б.4 – Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості

Номер п/п	Протипожежна перешкода	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальні межі вогнестійкості протипожежних перешкод або їх елементів, год
1	Протипожежні стіни	1	2.5
		2	0.75
2	Протипожежні перегородки	1	0.75
		2	0.25
3	Протипожежні перекриття	1	2.5
		2	1
4	Протипожежні вікна і двері	1	1.2
		2	0.6

У табл. Б.5 приведена допустима кількість поверхів і площа поверху і межах пожежного відсіку будівлі відповідно до ступеня вогнестійкості.

Таблиця Б.5 – Допустима кількість поверхів і площа поверху в межах пожежного відсіку будівлі.

Категорія будівлі (пожежних відсіків)	Допус- тима кількість поверхів	Ступінь вогнестійкості будівлі	Площа поверху в межах пожежного відсіку, м ² , будівель		
			Одноповерхових	багатоповерхових	
				2 поверхи	3 поверхи і більше
Д	1	III	не обмежується		
			5200	—	—

Мінімальні відстані між будівлями і спорудами відповідно до III ступеня вогнестійкості становлять 12 м.

У випадку виникнення пожежі робітники повинні: прийняти всі заходи по ліквідації вогню; місце, яке загорілось слід гасити вогнегасником; при загоранні електропроводів слід відключити лінію, а ізоляцію електропроводів необхідно гасити тільки вуглекислотним вогнегасником або піском; зупинити обладнання.

Біля входу станції необхідно встановити 1 порошковий вогнегасник ВП-5. На території повинно бути розташовано 2 пожежних щита, до комплексу засобів пожежогасіння, які розміщені на ньому, включені: вогнегасники ВП-5 – 3 шт., ящик з піском - 1 шт., покривало з негорючого теплоізоляційного матеріалу або повсті розміром 2м х 2м – 1 шт., гаки – 3 шт., лопати – 2 шт., ломи – 2 шт., сокири – 2 шт.

Ящик для піску має місткість 3,0 м³ та укомплектований совковою лопатою. Конструкція ящика повинна забезпечувати зручність діставання піску та виключати попадання опадів.

ДОДАТОК В
ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА ДО РОБОТИ

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____