

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної
екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ПАЛЯНИЦЯ ОЛЕКСІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.311.243

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз та моделювання роботи системи електропостачання з сонячними панелями

(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело _____

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи
Денисюк Анатолій Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання)

АНОТАЦІЯ

Паляниця О.А. Аналіз та моделювання роботи системи електропостачання з сонячними панелями. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

У даній кваліфікаційній роботі розглянуто перспективи та специфіку функціонування сонячних електростанцій. Проаналізовано переваги й недоліки експлуатації фотоелектричних станцій.

Подано опис основних складових системи електропостачання на базі сонячних панелей, зокрема панелей, контролерів заряду, інверторів та акумуляторних батарей.

Виконано моделювання роботи сонячної електростанції за допомогою спеціальної дослідницької установки, що дало можливість порівняти технічні характеристики монокристалічних і полікристалічних панелей при різних режимах роботи та дослідити режими функціонування елементів автономної системи електропостачання.

Проведено аналіз режимів роботи монокристалічних і полікристалічних панелей та сформовано рекомендації щодо виконання розрахунків під час моделювання елементів автономної системи електропостачання на базі сонячних панелей.

Ключові слова: система електропостачання, сонячні панелі, сонячна електростанція, моделювання.

ABSTRACT

Palianytsia O. Analysis and modeling of robotic electrical systems with solar panels. Qualification work for obtaining Master's Degree in specialty 141 - Electrical energetics, electrical engineering and electromechanics. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

This qualification work considers the prospects and specifics of the functioning of solar power plants. The advantages and disadvantages of the operation of photovoltaic plants are analyzed.

A description of the main components of a power supply system based on solar panels is provided, in particular panels, charge controllers, inverters and batteries.

The operation of a solar power plant is simulated using a special research facility, which made it possible to compare the technical characteristics of monocrystalline and polycrystalline panels in different operating modes and to study the operating modes of the elements of an autonomous power supply system.

The operating modes of monocrystalline and polycrystalline panels are analyzed and recommendations are formulated for performing calculations when modeling the elements of an autonomous power supply system based on solar panels.

Key words: power supply system, solar panels, solar power station, modeling..

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ ТА ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ	8
1.1. Переваги і недоліки роботи сонячних фотоелектричних станцій	8
1.2. Основні елементи системи електропостачання на базі сонячних панелей	12
1.2.1. Структурна схема	12
1.2.2. Сонячні панелі	12
1.2.3. Контролери	14
1.2.4. Інвертори	15
1.2.5. Акумуляторні батареї	17
1.2.6. Перспективи для моделювання	18
1.3. Висновки по першому розділу	18
РОЗДІЛ 2. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ	19
2.1. Принцип роботи електроустановки	19
2.2. Опис елементів встановлення	20
2.3. Розрахунок вироблення сонячної панелі з урахуванням характеристики типу панелі	26
2.4. Розрахунок ємності акумуляторної батареї	29
2.5. Розрахунок потужності основної шини та автономних інверторів напруги сонячної електростанції	32
2.6. Висновки по другому розділу	33
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ	34
3.1. Дослід режиму холостого ходу	34
3.2. Дослідження режиму паралельної роботи сонячних панелей	36
3.3. Дослідження режимів заряду акумуляторів сонячними панелями	38
3.4. Дослідження навантажувальних характеристик	40
3.5. Висновок по третьому розділу	43
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	45

ВСТУП

Високі темпи розвитку сонячної енергетики в сучасному світі дозволяють стверджувати, що в найближчим часом вона стане одним із головних джерел електроенергії.

«Відомо, що сьогодні один із перспективних напрямків, що дозволяє значно підвищити ефективність енергозбереження, є впровадження в енергетичну систему країни відновлюваних джерел енергії». [1–3]

«Нині фотоелектричний метод перетворення енергії є одним із провідних напрямів виробництва електроенергії серед відновлюваних джерел. У галузі сонячної енергетики найперспективнішими вважають сонячні фотоелектричні станції, що забезпечують пряме перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію за допомогою сонячних панелей, виготовлених із моно-, полікристалічного чи аморфного кремнію.» [1, 4]

Незважаючи на те, що в даний час вартість електроенергії, вироблюваної сонячними фотоелектричними станціями більше вартості електроенергії, що отримується від традиційних джерел (атомних, гідро- та теплоелектростанцій) перспективи їх очевидні. Цьому свідчать такі факти :

1. «Під час перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію сонячні батареї не завдають шкоди довкіллю, оскільки не створюють небезпечних для флори й фауни викидів чи відходів, не виснажують природних ресурсів і не становлять загрози для здоров'я людини. До того ж для такого способу виробництва електроенергії не потрібні ані рідкі, ані газоподібні види палива, які не потрібно транспортувати чи спалювати.» [5, 6].

2. «Ресурс роботи сонячних фотоелектричних станцій за основним компонентом – кремнію можна збільшити до 50 років і більше. Для цього слід усунути з технологічного процесу герметизації використання полімерних матеріалів. Для порівняння вітроенергетична станція зазвичай розрахована на 15–20 років роботи, а дизельні електростанції на 5-10 років. За прогнозами вчених ККД сонячних батарей у найближчі 10 років дорівнюватиме не менше 35%.» [5, 6].

3. «З підвищенням коефіцієнта корисної дії сонячних батарей суттєво зменшиться їх площа для вироблення необхідної електроенергії. Але вже в даний час порівняльний аналіз показує, якщо взяти діючі сонячні фотоелектричні станції та лінії електропередачі, то вільної землі, необхідної для виробництва кожного ГВт·год сонячної енергії потрібно все одно менше,

ніж при виробництві та передачі цієї ж кількості електроенергії від традиційних теплових електростанцій [1, 3].

4. Один кілограм кремнію, що використовується в сонячних батареях виробляє протягом 30 років близько 300 МВт·год електроенергії. Якщо підрахувати нафтовий еквівалент кремнію рівний 300 МВт·год з врахуванням теплоти згоряння нафти 43,7 МДж/кг, то вийде 25 т нафти на 1 кг кремнію. Якщо прийняти ККД теплових електростанцій, що працює на мазуті 33%, то 1 кг кремнію по електроенергії, що виробляється еквівалентний приблизно 75 т нафти.

Однак на шляху інвестицій у дані технології існує низка бар'єрів, серед них – невисока наочність проблеми, що зумовлено малими розмірами кожної окремої системи енергопостачання. Тому дана тема заслуговує на окрему увагу.

Отже, **метою даної роботи** є моделювання сонячних електричних станцій на основі характеристик, отриманих в результаті дослідження режимів роботи установки.

Для вирішення даної мети необхідно виконати завдання:

1. Провести дослідження режимів роботи монокристалічних і полікристалічних сонячних панелей.

2. Провести дослідження роботи сонячних панелей з акумуляторними батареями.

3. Провести дослідження роботи сонячних панелей з інвертором при різних типах навантаження.

4. Сформулювати рекомендації з виконання розрахунків необхідних при моделюванні режимів роботи сонячних панелей з різними типами навантаження.

Об'єктом дослідження змодельована система сонячного енергопостачання, що виконана у вигляді дослідної установки.

Предметом дослідження режими роботи елементів автономної системи електропостачання на базі сонячних панелей.

Публікації:

Денисюк А.Ю., Сукманюк О.М., Паляниця О.А. Переваги і недоліки роботи сонячних фотоелектричних станцій. *Біоенергетичні системи: матеріали ІХ міжн. наук.-практ. конф.* 19-20 листопада 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 43-48.

Паляниця О.А. Загальна характеристика сонячних батарей. *Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей наук.-практ. конф. за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей.* 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. 85 С. 74-75.

Паляниця О.А. Принцип роботи гібридної електроустановки. *Студентські читання–2025*: матеріали наук.-практ. конф. науково-педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Т2. 85 с. С. 54-56.

Структура кваліфікаційної роботи. Дана робота складається з вступу, 3 розділів, висновків, містить 25 рисунків, 11 таблиць, списку використаних джерел (15 джерела). Основний текст викладено на 47 сторінках.

РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ ТА ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

1.1. Переваги і недоліки роботи сонячних фотоелектричних станцій

Сонячна енергія, по відношенню до інших альтернативних джерел електропостачання, має найбільш широке розповсюдження.

Незважаючи на невелику частку в енергосистемі, сонячна енергетика України має серйозний потенціал: наша країна має доступ до найпередовіших технологій, налагоджено взаємодію з виробниками та постачальниками модулів, ведуться дослідження панелей як на кремнієвих, так і на багатоперехідних структурах, а існуючі системи електропостачання вже показують свою ефективність.

Сонячні фотоелектричні станції мають наступні переваги:

1. «Не потребує палива. Основними витратами є капіталовкладення (витрати на придбання обладнання та будівельно-монтажні роботи). При цьому експлуатаційні витрати (підтримка обладнання у працездатному стані) значно нижче з в порівнянні з іншими видами джерел електроенергії. Уже через 5 років експлуатації користувач починає отримувати електроенергію фактично безкоштовно. Монтаж панелей на опорах під кутом близько 70° забезпечує те, що взимку на їх поверхні не затримується сніг.»[4].

2. «Тривалий термін безперервної роботи. Сонячні батареї розраховані працювати протягом щонайменше 25 років. За цей період потужність знижується поступово й несуттєво. Упродовж наступних 20 років фотоелектричні станції здатні генерувати приблизно 80% початкової номінальної потужності. Загальна тривалість безаварійної експлуатації сягає близько 45 років. Крім того, всі процеси перетворення, стабілізації параметрів електроенергії та аварійного захисту повністю автоматизовані.»[4].

3. Надійність роботи. Високі показники надійності сонячних фотоелектричних станцій мають рахунок того, що й основні конструктивні елементи (сонячні батареї, інвертори, акумуляторні батареї, контролери) працюють у статичних режимах, тобто не містять пристроїв, що працюють в динамічних режимах.

4. «Безшумність роботи. Оскільки вироблення електроенергії здійснюється шляхом прямого перетворення сонячного випромінювання за допомогою сонячних панелей та інверторів на основі силових електронних компонентів, у процесі роботи практично не виникає шумів». [4].

5. Загальнодоступність. Практично в будь-якому регіоні України є можливість отримання електроенергії, що виробляється сонячними батареями. Відмінність в основному полягає в кількості годин освітленості, як правило, в середньому 2500-3000 год на рік. Особливості рельєфу, забудови, кліматичні умови, розміру ділянки, можуть не дозволити розмістити вітроенергетичну станцію, а для сонячної батареї потрібна лише не затінена поверхня, повернена на південний бік. При цьому, порівняно з вітроенергетичною станцією, не потрібне встановлення щогли, оскільки панелі можна розмістити на даху.

Однак сонячні фотоелектричні станції мають і недоліки, основними з яких є.

1. Залежність роботи від часу доби та погодних умов.

Однак дана проблема вирішується при використанні як накопичувача електроенергії акумуляторних батарей. Вирішення цієї проблеми може бути досягнуто також за рахунок застосування у складі системи електропостачання кілька типів джерел електроенергії, наприклад, крім сонячних фотоелектричних станцій вітроенергетичні установки, газопоршневі станції тощо. У даному випадку покращуватиметься не тільки економічні показники, оскільки вартість акумуляторних батарей вироблення на 1 кВт·год електроенергії більше, ніж у джерел енергії, що розглядаються, але такі системи зможуть забезпечувати безперебійне електропостачання відповідальних споживачів електроенергії (першої категорії).

2. Висока вартість сонячних батарей, пов'язана із застосуванням рідкісних елементів. Однак динаміка розвитку технологій показує, що за останні 12 років вартість фотоелементів, на базі яких створюються сонячні батареї, зменшилася в кілька разів, а вартість електроенергії, вироблюваної від традиційних джерел збільшилася більш ніж у 8 разів.

3. Необхідність періодичного очищення поверхні від пилу. Проте загалом експлуатаційні витрати на утримання сонячних фотоелектричних станцій значно нижчий порівняно з традиційними та іншими видами відновлюваних джерел енергії.

4. Втрати надлишків енергії, що виробляється. Коли система електропостачання, що генерує електроенергію від сонячних фотоелектричних станцій, виробляє більше електроенергії, ніж потрібно споживачам, даний надлишок може спрямовуватись до зовнішньої енергетичної системи.

Сонячні батареї відключаються від акумуляторних батарей коли вони повністю заряджені. Один із варіантів підвищення ефективності використання сонячних фотоелектричних станцій надлишок енергії

спрямовувати на баластне навантаження (нагрівачі пристрою, освітлювальне навантаження тощо).

«Незважаючи на розглянуті недоліки сонячних фотоелектричних станцій, можна зробити висновок про те, що фотоелектричне перетворення є ефективним способом отримання електроенергії навіть за умов розсіяного сонячного освітлення та дозволяє будувати електростанції різної потужності. Такі системи характеризуються низьким споживанням електроенергії на власні потреби, простотою автоматизації, високою безпекою, надійністю та зручністю в обслуговуванні.» [4].

Для значного покращення експлуатаційно-технічних характеристик сонячних електростанцій у їх структурі необхідно застосовувати нову елементну базу. Одним із ненадійних функціональних елементів сонячної фотоелектричної станції є автономні інвертори.

«Застосування у складі автономні інвертори однофазно-трифазних трансформаторів магнітним полем, що обертається дозволить зменшити кількість силових електронних приладів у схемі перетворення та стабілізації напруги, спростити систему управління та захисту, зменшити рівень електромагнітних перешкод, створюваних силовими електронними приладами під час комутації, і загалом підвищити ККД та показники надійності автономних інверторів сонячних електростанцій» [7, 8].

Хороший технічний ефект досягається при використанні в складі сонячних фотоелектричних станцій комбінованих силових комутаційних апаратів.

«Такі пристрої містять силові електронні прилади та електромеханічні контакти, що дозволяють виключити з конструкції дугогасні пристрої, підвищити надійність, ресурс, ККД та швидкодію роботи комутаційного апарату» [10].

«Модульний принцип побудови сонячних фотоелектричних станцій також підвищить надійність роботи системи електропостачання за рахунок резервування роботи основних функціональних елементів (сонячних батарей, автономних інвертор, акумуляторних батарей, комутаційних апаратів, пристроїв керування та захисту). Крім того монтаж сонячних фотоелектричних станцій за модульним принципом покращує ремонтпридатність таких систем, зокрема скорочує тривалість проведення технічного обслуговування та ліквідацію несправностей в аварійних ситуаціях, полегшує завдання по зміни її структури залежно від потреб споживачів» [10, 11].

«Завдання синтезу модульних структур сонячних фотоелектричних станцій повинне включати в себе» [11]:

- розробку структури системи електропостачання з врахуванням вимог споживачів до якості електричної енергії та допустимий час перерви в електропостачанні;

- визначення рівня резервування основних функціональних елементів з урахуванням ймовірності їхньої безвідмовної роботи та напрацювання до першої відмови.

Для забезпечення тривалого ресурсу роботи сонячних фотоелектричних станцій необхідності знати особливості роботи сонячних батарей.

1. У зимовий час продуктивність сонячних батарей знижується у 1,5–2 рази.

2. Низька ефективність сонячних батарей для використання в опалювальних системах через подвійне перетворення енергії (з початку сонячна енергія в електричну, а потім електрична теплову. Вже відомо, що «для опалення та нагрівання води значно більший ефект дають сонячні колектори оскільки сонячні батареї перетворює на електричну до 20 % сонячної енергії, а сонячний колектор такої самої площі перетворює на тепло близько 90 % сонячної енергії. При цьому сонячний колектор в 1,5–2 рази дешевше за сонячну батарею однієї й тієї ж площі». [7].

3. Відносно висока вартість сонячних батарей робить їх рентабельними лише у разі, коли витрата електроенергії оптимізована. Для цього необхідно використовувати сучасну енергозберігаючу техніку, світлодіодне освітлення тощо.

4. «Природно, що ефективність сонячних буде вищою там, де більше сонячного світла. Найменша ефективність може бути в місцях з високою сезонною хмарністю або туманом на узбережжі. В даному випадку необхідно дослідити інтенсивність сонячної радіації, результатам якого буде зрозуміло скільки електроенергії зможуть виробляти сонячні батареї у досліджуваному регіоні та чи є установка сонячних фотоелектричних станцій доцільною». [7].

5. З економічної точки зору, власнику сонячної фотоелектричної станції вигідно. В даний час продавати електроенергію енергосистемі в денний час, і купувати її в енергетичної компанії в нічний час (через занижених нічних тарифів). Але тут невирішені питання з законодавчою базою.

6. В даний час доцільно використовувати сонячну фотоелектричну станцію там, де немає мереж централізованого електропостачання. Для забезпечення електроенергією у темний час доби або у періоди без яскравого сонячного світла необхідна акумуляторна батарея або інше резервне джерело електроенергії.

1.2. Основні елементи системи електропостачання на базі сонячних панелей

1.2.1. Структурна схема

Влаштування більшості сонячних фотоелектричних станцій можна подати у вигляді схеми, зображеної на рис. 1.1. Основними елементами є сонячні панелі, які підключені до контролера заряду та розряду. Паралельно панелям до контролера підключені акумуляторні батареї, а також є можливість підключення навантаження, розрахованої на 12В постійного струму. Далі до контролера підключається інвертор для перетворення постійного струму напругою 12В змінну напругу 220В, з можливістю підключення відповідного навантаження.



Рисунок 1.1. Структурна схема сонячної електростанції

В якості допоміжного обладнання використовують засоби комутації, запобіжники, вимірювальні прилади, з'єднувальні дроти.

1.2.2. Сонячні панелі

Як джерело живлення на сонячній фотоелектричній станції використовуються фотоелектричні модулі. Як вже було сказано, вони широко поширені в різних сферах життя людини, а тому різноманітні за своїм конструктивним виконанням: модулі в алюмінієвій рамі, покриті склом, полегшені безрамкові модулі, двосторонні модулі, гнучкі модулі та ін.

Також сонячні модулі виготовляються із різних за складом з'єднань, що впливає на зовнішній вигляд панелі та її властивості. Класифікація фотоелектричних модулів за матеріалом відображена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Класифікація фотоелектричних модулів

№ п/п	Тип	Характеристики
1	Батареї із монокристалічного кремнію 	<p>Це найпоширеніший і найпопулярніший тип сонячних батарей. Їх виготовляють шляхом вирощування кристалів високочистого кремнію: під час лиття розплавлений матеріал твердне при контакті із затравкою кристала. У процесі охолодження кремній поступово утворює циліндричний монокристалічний злиток діаметром 13–20 см і довжиною до 200 см.</p> <p>Після цього злиток розрізають на тонкі пластини товщиною 250–300 мкм. Такі фотоелементи відзначаються підвищеною ефективністю порівняно з елементами, виготовленими іншими методами: їхній коефіцієнт корисної дії досягає 19% завдяки упорядкованій орієнтації атомів монокристалу, що забезпечує кращу рухливість електронів. Поверхня кремнію покрита металевою електродною сіткою.</p> <p>Зазвичай монокристалічні модулі встановлюють у міцну алюмінієву рамку та захищають ударостійким склом. Колір таких фотоелементів — темно-синій або чорний.</p>
2	Батареї із полікристалічного кремнію 	<p>Полікристалічний кремній є альтернативою монокристалічному та має нижчу собівартість. У його структурі кристали утворюють агрегати, але відрізняються за формою й орієнтацією. На відміну від темних монокристалічних елементів, полікристалічні вироби мають характерний яскраво-синій відтінок.</p> <p>Завдяки вдосконаленню технології виробництва сучасні полікристалічні елементи демонструють електричні характеристики, які лише незначно поступаються параметрам монокристалічного кремнію.</p>

3	<p>Сонячні батареї із аморфного кремнію</p> 	<p>Сонячні батареї на основі аморфного кремнію характеризуються одним із найнижчих коефіцієнтів корисної дії — зазвичай не більше ніж 6–8%. Проте серед усіх кремнієвих технологій саме вони забезпечують найдешевше виробництво електроенергії..</p>
4	<p>Сонячні батареї на основі телуриду кадмію</p> 	<p>Панелі з телуриду кадмію (CdTe) виготовляють за тонкоплівковою технологією: напівпровідниковий шар наносять у вигляді дуже тонкої плівки завтовшки кількасот мікрометрів. Ефективність таких елементів невисока — близько 11%, однак у порівнянні з кремнієвими модулями їхня потужність обходиться на кілька десятків відсотків дешевше.</p>
5	<p>Сонячні батареї на основі CIGS</p> 	<p>CIGS — це напівпровідниковий матеріал, що містить мідь, індій, галій і селен. Сонячні батареї цього типу також належать до плівкових, але відрізняються вищою ефективністю: їхній ККД може сягати приблизно 15%.</p>

На даний момент на світовому ринку представлено широкий вибір виробників. Досить популярні марки – Delta, Feron [4, 5].

1.2.3. Контролери

Будь-яка автономна система електропостачання, що містить у своєму складі акумуляторні батареї, повинна бути оснащена засобами контролю заряду та розряду акумуляторів, завдання яких – відключати АКБ після досягнення максимальної зарядної напруги, щоб уникнути перезаряду, википання електроліту та скорочення терміну служби акумуляторів.

Напруга відключення навантаження для свинцево-кислотних батарей зазвичай лежить в межах від 10,5 до 11,5 В. Для 12 В акумуляторних батарей при більш ніж 10-годинному розряді це означає використання від 100 до 20% номінальної ємності.

При більш швидких розрядах кількість ємності, що відбирається, зменшується

Контролери заряду для фотоелектричних систем бувають 2-х основних типів: шунтові та послідовні.

У шунтових контролерах сонячна батарея замикається на коротко; таким чином, струм від сонячної батареї проходить через шунт і не потрапляє в акумулятор. Такий принцип роботи не дозволяє підключати до входу контролера інші джерела енергії, за винятком фотоелектричних батарей.

У послідовних контролерах джерело енергії відключається від акумулятора та навантаження. Напруга на джерелі енергії піднімається до значення напруги холостого ходу. Приклад контролера зображено рис. 1.2.



Рисунок 1.2. Контролер заряду/розряду АКБ на сонячній фотоелектричній станції

Найбільш складні контролери вміють стежити за точкою максимальної потужності фотоелектричних батарей. PWM або ШІМ технологія є більш простою і полягає у використанні широтноімпульсного перетворювача на завершальній стадії заряду акумуляторної батареї. На початку процесу заряду сонячна батарея фактично приєднана безпосередньо до акумулятора. Сонячний контролер заряду PWM або ШІМ має значно меншу вартість за ампер, в порівнянні з технологією MPPT, і тому заслужив таку популярність серед користувачів.

Застосування PWM контролерів має сенс у системах малої потужності, коли немає можливості використовувати дорожчий MPPT контролер, а також у регіонах із високою сонячною активністю. Найпоширеніші марки контролерів: EPSolar, SRNE, Helios.

1.2.4. Інвертори

Як було зазначено раніше, інвертори служать щоб одержати змінну напругу 220-380В. Існують два типи інверторів: мережеві (підключені до

живлення мережі) та автономні. Інвертори часто забезпечені функцією джерела безперебійного живлення: в інвертор вбудований зарядний пристрій для підзаряду акумуляторів під час живлення від мережі, а також блок стеження за наявністю та якістю напруги.

Основною характеристикою інвертора є форма вихідної напруги. Вихідний сигнал може мати синусоїдальну форму або квазисинусоїдальну форму.

Інвертори, що перетворюють напругу в чисту синусоїдальну форму, є більш якісними, оскільки форма напруги і струму близька до ідеальної синусоїди, перевершуючи за якістю навіть мережеві параметри, що забезпечує надійну роботу електроприладів і захищають від несправності особливо чутливих пристроїв, що, безсумнівно, позначається на ціні.

Квазисинусоїдальні інвертори імітують синусоїдальну форму напруги і струму, вони дешевші, компактніші і найбільш поширені. Приклад інвертора зображено рис. 1.3.



Рисунок 1.3. Інвертор, що встановлюється в сонячних фотоелектричних станціях

Порівняльні форми напруги інвертора з «чистим синусоїдом» і квазисинусоїдального інвертора наведено на рис. 1.4.

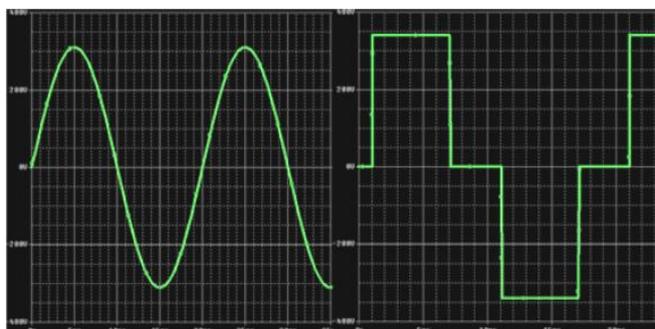


Рисунок 1.4. Синусоїдальна та квазисинусоїдальна форма напруги на виході інвертора

Вибір інверторів теж досить широкий, можна придбати як вітчизняні інвертори марки OrangeWOW, Elim, так і зарубіжні інвертори N-Power, TBS Electronics та інші.

1.2.5. Акумуляторні батареї

Акумулятори на сонячній електростанції служать для накопичення заряду і використовуються як джерело автономного резервного живлення. Вони бувають трьох типів: гелеві (GEL), AGM та рідкокислотні.

«AGM означає «абсорбуючі скляні мати». По суті, це склотканина, розташована між позитивними та негативними свинцевими пластинами. Оскільки електроліт перебуває у зв'язаному стані, такі акумулятори можна експлуатувати в будь-якому положенні, навіть боком.» [7]

«AGM-батареї є найдоступнішими (не враховуючи автомобільних), а їхній типовий ресурс становить близько 5 років, хоча існують моделі, розраховані й на 10 років експлуатації. Стандартний акумулятор цього типу витримує приблизно 200 циклів повного розряду (100%), близько 350 циклів при глибині розряду 50% і до 800 циклів при розряді на 30%.» [7]

Застосовувати акумулятори AGM доцільно в системах резервного живлення, тобто там, де циклування (розряди) буде досить поодиноким. За умови дотримання оптимального температурного режиму (15-25 градусів Цельсія) і якщо не залишати батарею в розрядженому стані, модель AGM прослужить заявлений виробником термін служби.

«У гелевих акумуляторах як сепаратор між свинцевими пластинами використовується силікагель, який у процесі виробництва заливають у проміжки між пластинами. Після застигання силікагель утворює тверду структуру з великою кількістю пор, у яких утримується електроліт. Завдяки повному заповненню простору між пластинами ризик осипання свинцевих пластин у гелевих батареях практично відсутній, що усуває можливість короткого замикання та подовжує термін їхньої роботи». [7]

Для систем автономного живлення застосовувати рідко-кислотні автомобільні акумулятори не рекомендується, оскільки вони не призначені для тривалої розрядки малими струмами і мають мінімальну кількість циклів серед інших типів (зазвичай, не більше 50). Їхнє основне призначення – віддати дуже великий струм стартеру протягом декількох секунд при старті двигуна. Приклади АКБ представлені рис. 1.5.



Рисунок 1.5. Акумуляторні батареї

Крім типу, найбільш значущими характеристиками АКБ є ємність, число циклів заряду та розряду, термін служби.

1.2.6. Перспективи для моделювання

При вивченні питань електроенергетики часто можна спостерігати процеси, які маючи місце на невеликій установці або пристрої, зберігаються при збільшенні масштабів системи, що розглядається, і застосовуваного в ній обладнання. Це дозволяє ефективно використовувати моделювання в електроенергетичних системах.

При розгляді проблем і перспектив сонячної енергетики в Україні та світі, а також при аналізі видів сонячних фотоелектричних систем і обладнання, що використовується на них, було прийнято рішення про створення спеціальної дослідної установки, що складається з сонячних панелей різних типів, контролера, АКБ, інвертора, навантаження і дозволяє вивчити процеси генерації, перетворення сонячної електростанції.

1.3. Висновки по першому розділу

Сонячна енергетика – дуже перспективна галузь. Обсяги генеруючих потужностей зростають з кожним днем, будуються нові сонячні електростанції, фотоелектричні модулі виробляються у промислових масштабах, стаючи все доступнішими.

В нашому випадку плануємо застосовувати комбінування дослідної енергетичної установки та автономної сонячної електростанції. Основними елементами такої електростанції будуть сонячні модулі, контролери, інвертори та АКБ. Характеристики та конфігурація обладнання підбираються відповідно до конкретних умов, що дозволяє зробити широкий вибір моделей та виробників.

Оскільки процеси, що протікають під час експлуатації сонячної електричної станції малої потужності, легко застосовні до більших станцій, це обумовлює доцільність і простоту моделювання. Тому було прийнято рішення про створення дослідницької установки, де можна проводити дослідження різних режимів роботи сонячної електричної станції.

РОЗДІЛ 2. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ

2.1. Принцип роботи електроустановки

З метою вивчення можливостей роботи сонячних панелей для забезпечення системи електропостачання було прийнято рішення про створення дослідної установки.

Було розглянуто різні типи основного обладнання, а саме: сонячні панелі, контролери, акумуляторні батареї, інвертори та різні комбінації електричного навантаження. Також були розглянуті різні варіанти компоновання установки.

Основну увагу було зроблено на відповідність структурній схемі, що зображена на рис. 1.1. Більш детальну версію даної схеми зображено на рис. 2.1.

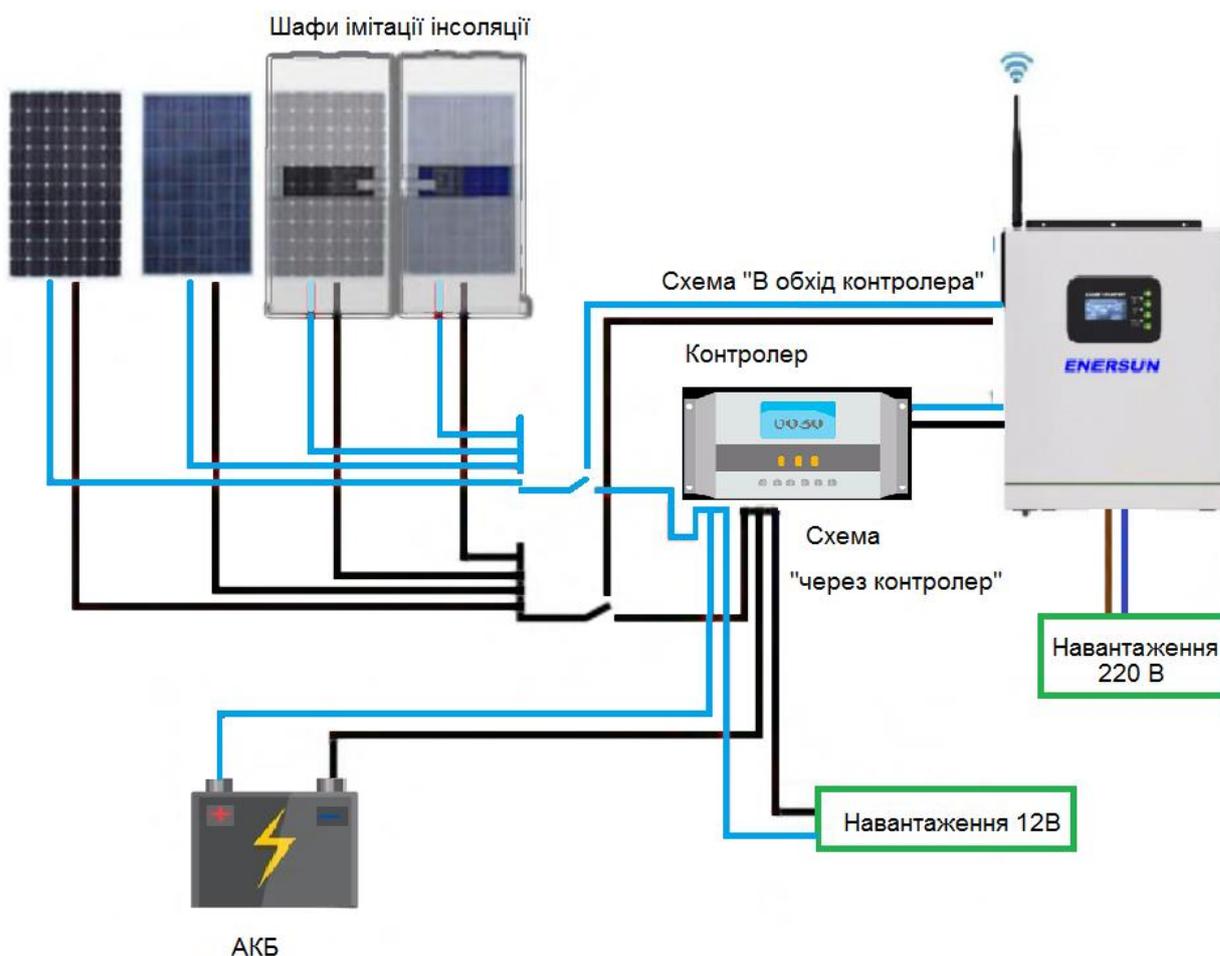


Рисунок 2.1. Структурна схема

Згідно з даною схемою, на стенді показано 4 сонячні панелі: 2 монокристалічні та 2 полікристалічні. Вибір різних типів панелей передбачає можливість їх порівняння при мінливому освітленні, для задоволення даних

потреб по одній моно- та полікристалічній панелі знаходяться в умовах природної освітленості аудиторії, а інша пара панелей вміщена в спеціалізовані шафи імітації інсоляції, які ізольовані від зовнішнього освітлення, забезпечені люксометрами та прожекторами, потужність освітлення яких регулюється димерами. Дані рішення дозволяють вручну моделювати певний рівень освітленості та досліджувати відповідний режим роботи панелей.

Панелі за допомогою з'єднувальних проводів підключені до контролеру та інвертору. Слід зазначити, що є можливість перемикання між двома схемами: підключення панелей до контролера або підключення в обхід нього безпосередньо до інвертора, що дозволяє детально розглянути вплив даних пристроїв на роботу станції та зробити висновок про доцільність встановлення контролера. Також на установці є АКБ та електричне навантаження.

Принципова електрична схема установки зображена рис. 1 (додаток А). З електричної схеми видно, що установка має підключення до мережі 220В, що дозволяє її розглядати як сонячну електричну станцію електропостачання. Крім того, живлення вимірювальних приладів та індикаційне підсвічування також живиться від зовнішньої мережі, що дозволяє не враховувати їх вплив на роботу станції та характеристики, що знімаються.

2.2. Опис елементів встановлення

Монокристалічні панелі представлені моделлю «JA Solar JAM54D40-455/LB, 455 Вт, Bifacial Double Glass, Black Frame» [9]. Технічні характеристики панелі представлені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Технічні характеристики сонячних модулів «JA Solar JAM54D40-455/LB»

Основні	
Виробник	JA Solar
Країна виробник	Китай
Тип панелі	Монокристалічна
Матеріал виготовлення модуля	Монокристалічний кремній
Матеріал рамки	Алюміній
Напруга	1500 В

Потужність	455 Вт
Струм при максимальній потужності	13.79 А
Напруга при максимальній потужності	33 В
Струм короткого замикання	14.56 А
Напруга холостого ходу	39.5 В
Кількість елементів	108 шт.
Мінімальна робоча температура	-40 град.
Максимальна робоча температура	85 град.
Ступінь захисту IP	68
ККД, не менше	22.8 %
Гарантійний термін	180 міс
Габаритні розміри	
Вага	22 кг
Довжина	1762 мм
Ширина	1134 мм
Товщина	30 мм
Температурні коефіцієнти	
Температурний коефіцієнт струму	0.045 %/° C
Температурний коефіцієнт напруги	-0.25 %/° C
Температурний коефіцієнт потужності	-0.29 %/° C

Зовнішній вигляд представлений рис. 2.2 [4].

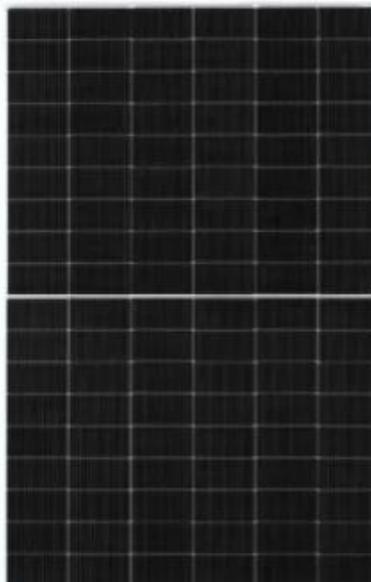


Рисунок 2.2. Фотоелектричний модуль «JA Solar JAM54D40-455/LB».

Полікристалічні панелі представлені моделлю «KDM 100 Вт / 12 В KD-P100». Технічні характеристики панелі представлені у табл. 2.2.

Зовнішній вигляд представлений рис. 2.3 [4].



Рисунок 2.3. Полікристалічна сонячна панель KDM 100 Вт / 12 В KD-P100

Таблиця 2.3. Технічні характеристики панелі

Основні	
Виробник	Kingdom Solar
Країна виробник	Китай
Матеріал рамки	Алюміній
Напруга холостого ходу	21.6 В
Тип панелі	Полікристалічна
Струм короткого замикання	6.28 А
Кількість елементів	36 шт.
Габаритні розміри	
Вага	11 кг
Довжина	1190 мм
Ширина	674 мм
Характеристики фотомодуля	
Гарантія на фотомодуль	10 років
Максимальна напруга системи	1000 В (DC)
Номінальна потужність панелі	100 Вт
Номінальна напруга	17.5 В
Номінальний робочий струм	5.71 А
Користувальницькі характеристики	
Потужність сонячних батарей	100
Виробник сонячних модулів	KDM
Тип сонячних батарей	Полікристалічні

При виборі інвертора було прийнято рішення, що найбільше придатним для задоволення поставлених завдань з вивчення різних режимів роботи сонячних електричних систем буде саме мережевий інвертор, який має функції підзаряду батареї від мережі, стеження за наявністю та якістю мережевої напруги та джерела безперебійного живлення. Завдяки такому рішенню можлива робота системи при виключеному з неї контролері.

Було обрано джерело безперебійного живлення «Must Power PV18-3224 PRO» із вбудованою системою дистанційного контролю, управління та оповіщення через SMS та Інтернет. Технічні характеристики інвертора представлені табл. 2.4.

Зовнішній вигляд представлений рис. 2.4 [10].



Рисунок 2.4.Інвертор Must Power PV18-3224 PRO

Таблиця 2.4. Технічні характеристики інвертора Must Power PV18-3224 PRO

Номінальна потужність	3200Вт
Пікова потужність	6400Вт
Форма вихідного сигналу	Чиста синусоїда
Напруга АКБ	24В
Макс. напруга ХХ панелей	400В
Макс. вхідний струм від мережі	60А
Макс. зарядний струм від МРРТ	100А
Діапазон напруги МРРТ	150~400Vdc max
ККД	90-93%
Розмір, мм	486*322*134 мм
Вага	8 кг.

Як АКБ розглядалися акумулятори CSB GP12400 12V 40Ah, спеціально призначені для роботи в автономних та резервних системах електропостачання та виготовлені за технологією GEL (компонитний гель замість електроліту). Технічні характеристики АКБ "LPM-MG 12V - 40 Ah" (12V / 40Ah) представлені в табл. 2.5. Зовнішній вигляд представлений на рис. 2.5 [11].



Рисунок 2.5. Акумуляторна батарея LPM-MG 12V - 40 Ah

Таблиця 2.5. Технічна характеристика АКБ LPM-MG 12V - 40 Ah

Основні характеристики	
Номінальна ємність, Ah	40
Номінальна напруга, V	12
Загальні характеристики	
Тип	AGM мультигелевий
Зарядна напруга (буферний режим), V	13,5-13,8
Зарядна напруга (циклічний режим), V	14,5-14,9
Струм короткого замикання, A	1200
Номінальний струм заряду, A	4
Тип клеми	T6 (під болт M6)
Кількість циклів	800
Матеріал корпусу	Пластик
Габарити та умови роботи	
Температура зберігання АКБ, °C	-25 ~ +50
Робоча температура заряду, °C	-20 ~ +50
Робоча температура розряду, °C	-20 ~ +50
Довжина, мм	196
Ширина, мм	165
Висота, мм	173
Гарантія, міс	12
Вага, кг	12.05

Як контролер був обраний «Tracer-2210A MPPT», з системою стеження за точкою максимальної потужності фотоелектричних панелей. Технічні характеристики контролера «Tracer-2210A MPPT» представлені у табл. 2.6. Зовнішній вигляд представлений на рис. 2.6. [12].



Рисунок 2.6. Контролер «Tracer-2210A, MPPT 20A 12/24В

Таблиця 2.6. Технічні характеристики контролера «Tracer-2210 А MPPT».

Технічні характеристики:	
Модель	Tracer2210A
Номанальний струм заряду акумулятора	20A
Номінальний струм навантаження	20A
Системна напруга	12В/24В автоматичне визначення
Допустимий діапазон напруги акумулятора	8-32В
Максимальна напруга холостого ходу сонячної батареї	100В за мінімально можливої температури
	92В при температурі +25 градусів
Максимальна вхідна потужність від сонячної батареї	12В – 260Вт; 24В - 520Вт
Напруга вирівнюючого заряду	AGM - 14,6В, Заливні - 14,8В
Напруга основного заряду	GEL - 14,2В, AGM - 14,6В, Заливні - 14,8В
Напруга підтримуючої зарядки	13,8В
Напруга вимкнення навантаження	11,1В
Напруга поновлення живлення навантаження після вимкнення	12,6 В
Власне споживання	<20mA12В); <16mA (24В)
Температурна компенсація	-5 мВ / ° C / 2 В
Робоча температура	-25 °C ~ +45 °C
клас захисту	IP30
Габарити	220 мм * 154 мм * 52 мм
Клемник	16мм. кв.
Вага	1,1 кг

Наявність навантаження змінного струму різних типів з різними коефіцієнтами потужності дозволяє досліджувати режими роботи сонячної електричної станції в умовах активної, реактивної та змішаної навантаження.

2.3. Розрахунок вироблення сонячної панелі з урахуванням характеристики типу панелі

Розрахунок потоку сонячної енергії поділяється на дві складові: потік сонячної енергії на похилу поверхню та потік енергії на нормальну до сонячного випромінювання поверхню. Даний розрахунок базується на багаторічних даних, опублікованих у довідниках, та необхідний для визначення значення сонячної радіації для того чи іншого регіону.

У загальному випадку на похилу поверхню падають три компоненти сумарного сонячного випромінювання: прямого сонячного випромінювання з інтенсивністю $I_{\text{п}}$, розсіяного дифузного сонячного випромінювання з інтенсивністю $I_{\text{д}}$ і відбитого від Землі з інтенсивністю, визначається за формулою:

$$I_{\text{вд}} = \rho(I_{\text{п}} + I_{\text{д}}) \quad (2.1)$$

Дані компоненти мають різні кутові характеристики. Співвідношення між інтенсивністю прямої складової сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню $I_{\text{п}}$, Вт/м, і на похилу $I_{\text{н}}$ поверхні Вт/м, визначаються виразами:

$$\begin{aligned} I_{\text{п}} &= I_{\text{н}} \cos \tau, \\ I_{\text{вд1}} &= I_{\text{н}} \cos \varepsilon \end{aligned}$$

де $I_{\text{н}}$, Вт/м – інтенсивність прямого сонячного випромінювання нормально орієнтовану поверхню;

τ – кут між напрямками на Сонці і zenit (кут падіння на горизонтальну поверхню);

ε – кут між напрямками на Сонце та нормаллю до похилої поверхні (кут падіння на похилу поверхню), орієнтованої на південь:

$$\cos \tau = \sin \delta \sin \varepsilon + \cos \delta \cos \varepsilon \cos \omega, \quad (2.2)$$

$$\cos \varepsilon = \cos(\varepsilon - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varepsilon - \beta) \sin \delta. \quad (2.3)$$

де δ - кут відмінювання, тобто кутове положення Сонця в сонячний полудень щодо площини екватора;

ε – широта місцевості;

ω – годинний кут руху Сонця, що дорівнює 0 в сонячний полудень; щогодини часу t відповідає 15° довготи, причому значення годинникового кута до полудня вважаються позитивними, а після полудня – негативними:

$$\omega = \frac{\pi t}{12}. \quad (2.4)$$

моменти сходу і заходу Сонця, що визначаються умовою $\epsilon = \frac{\pi}{2}$, виражаються однією і тією ж величиною t_s [8], яка рахується позитивною для сходу і негативною – для заходу [8]:

$$\cos\omega_s = \cos\left(\frac{\pi t_s}{12}\right). \quad (2.5)$$

β – кут нахилу розглядаємої поверхні до горизонту.

Значення кута сонячного похилення можна визначити за формулою:

$$\delta = 23.5\sin\left(360^\circ \frac{284+n}{365}\right). \quad (2.6)$$

де n – порядковий номер дня року, що відраховується з 1 січня.

Якщо розподіл розсіяного випромінювання по небокраю рівномірний (яскравість неба, за виключенням Сонця, однакова в тому числі, коли небо покрите хмарами, суцільний туман, інтенсивність розсіяного випромінювання на похилу поверхню залежить від того, яку частину неба «бачить» приймальник і визначається за наступною формулою:

$$I_{вд2} = I_n \frac{1\cos\beta}{2}, \quad (2.7)$$

Аналогічна розраховується значення інтенсивності відбитого випромінювання на похилу поверхню, що визначається тією частиною поверхні Землі, яку «бачить» похила поверхня:

$$I_{вд3} = \rho(I_n + I_d) \frac{1\cos\beta}{2}, \quad (2.8)$$

Сумарна інтенсивність сонячного випромінювання на похилій поверхні представляє сукупність трьох зазначених вище компонентів:

$$I_{вд} = I_n \cos\epsilon + I_n \frac{1\cos\beta}{2} + \rho(I_n + I_d) \frac{1\cos\beta}{2}, \quad (2.9)$$

Дана інтенсивність є змінною у часі не лише через добового обертання Землі, що визначає явну тимчасову залежність годинного кута ω (2.4), але і через випадкову тимчасову залежність інтенсивність прямого сонячного випромінювання.

Величина($\cos\epsilon$) визначає середній потік сонячної енергії на похилу поверхню на добовому інтервалі годинникових кутів освітлення похилої поверхні Сонцем $\Delta\omega$:

$$\cos\epsilon = \cos(\epsilon - \beta) \cos\delta(\cos\omega) + \sin(\epsilon - \beta)\sin\delta, \quad (2.10)$$

Для зимового півріччя ($\delta \leq 0$):

$$\cos\omega = \frac{\sin\omega_s}{\omega_s}. \quad (2.11)$$

де ω_s – кут сходу-заходу Сонця, що дає таке рівняння визначення кута нахилу $\beta_{\text{кн}}$ [9]:

$$\text{tg}(\varphi - \beta_{\text{кн}}) = \frac{\text{tg}\delta\omega_s}{\sin\omega_s}. \quad (2.12)$$

Для літнього півріччя ($\delta \geq 0$):

$$\cos\omega = \frac{\sin\omega_l}{\omega_l}. \quad (2.13)$$

де ω_l – часовий кут Сонця, що відповідає умови $\cos\epsilon = 0$, що дає [9]:

$$\cos\omega_l = -\text{tg}\delta\text{tg}(\varphi - \beta_{\text{кн}}). \quad (2.14)$$

Для зимових періодів до весняного рівнодення та після осіннього рівнодення основний внесок у повний період сонячної енергії дають термін поблизу сонячного полудня, причому годинникові кути ω_l , сходу та заходу Сонця виявляються значно менше 90° . Тому у виразі (2.12) в даних умовах можна положити $\omega_l = 0$. Це дає простий вираз:

$$\beta_{\text{кн}} = (\varphi - \delta), \quad (2.15)$$

що відповідає орієнтації поверхні не тільки на південь, а й на напрямок максимуму інтенсивності прямого сонячного випромінювання в опівдні.

Для літнього періоду оптимальне значення $\beta_{\text{кн}}$, що визначається з рівнянь (2.10), (2.13), (2.14) виявляється менше значення (2.15). На практиці вираз (2.15) придатний для оцінного розрахунку максимального приходу сонячної енергії протягом усього року.

Відповідно до цього середньодобовий за багаторічний період потрапляння сонячної енергії на одиницю похилої поверхні $E_{\text{пп}}$, Вт·год/(м·доб) рівний:

$$\begin{aligned} \delta \leq 0 \\ E_{\text{пп}} = I_{\text{вд}} 12 \left(\frac{2\omega_s}{\pi} \right), \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \delta \geq 0 \\ E_{\text{пп}} = I_{\text{вд}} 12 \left(\frac{2\omega_l}{\pi} \right), \end{aligned} \quad (2.17)$$

де $12\left(\frac{2\omega_s}{\pi}\right)$, $12\left(\frac{2\omega_l}{\pi}\right)$ – год/доб – число годин у світлий період доби.

2.4. Розрахунок ємності акумуляторної батареї

«У темну пору доби накопичена в акумуляторній батареї автономної сонячної електростанції енергія використовується навантаженням. Місткість акумуляторної батареї показує потенціал, тобто, скільки часу вона при умові, що повністю заряджена, може мати навантаження. Місткість вимірюється в ампер-годинниках. У міру розряду напруга та енергоємність акумуляторної батареї падають. Витрата ємності ΔC акумуляторної батареї за час живлення навантаження $\Delta t_{\text{нв}}$ визначається за наступною формулою:» [16]

$$\Delta C = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \Delta t_{\text{нв}} = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} (24 - \Delta t_{\text{дв}}), \quad (2.18)$$

де " $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність навантаження;» [16]

" $U_{\text{н}}$ – номінальна напруга навантаження;» [16]

« $\Delta t_{\text{нв}}$ – інтервал нічного терміну доби (в літній період $\Delta t_{\text{нв}}=10$ год, зимній - $\Delta t_{\text{нв}} = 16$ год);» [16]

" $\Delta t_{\text{дв}}$ – інтервал денного терміну доби.» [16].

При глибокому розряді акумулятор може вийти із ладу. Для того, щоб акумуляторна батарея служила довше, її не бажано розряджати більше ніж на 80%. «Ступінь розрядженості акумуляторної батареї:» [16]

$$S_p = \frac{C_n - C_{\text{min}}}{C_n} 100\% = \frac{\Delta C}{C_n} 100\%. \quad (2.19)$$

Виразивши із (2.19) ємність C_n з врахуванням (2.18) отримаємо вираз для визначення потрібної ємності акумуляторної батареї у вигляді:

$$C_n = \frac{100}{S_p} \cdot \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \Delta t_{\text{нв}}. \quad (2.20)$$

«Рівняння (2.20) дозволяє легко розрахувати необхідну акумуляторну ємність батареї при постійному навантаженні. Важкий режим експлуатації акумуляторної батареї становить зимовий час, тому у розрахунках за формулою (2.20) приймають $\Delta t_{\text{нв}} = 16$ год, а ступінь розрядження акумуляторної батареї – $S_p = 70\%$.» [16].

«При більшій вихідній напрузі автономної сонячної електростанції, стає меншою ємність, струм розряду $I_p = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}}$ акумуляторної батареї та нижче її ціна. Для стаціонарних (промислових) свинцевих акумуляторів

максимальний струм розряду обмежений значенням, яке чисельно в амперах становить від 5 до 25 ємностей акумулятора. При меншому струмі автономної сонячної електростанції, стають менші омічні втрати потужності, вищий коефіцієнт корисної дії та нижча вартість сонячної електростанції, а отже вигідно мати електричні системи високої напруги.

«Акумуляторна батарея з ємністю C_n складатися з окремо виготовлених серійних батарей невеликої ємності методом послідовного та паралельного їх з'єднання. При послідовному з'єднанні окремих акумуляторних батарей збільшується напруга, а ємність декількох акумуляторної батареї відповідає ємності окремої акумуляторної батареї. При паралельному з'єднанні акумуляторна батарея, має таку ж напругу що і одна акумуляторна батарея, а ємність дорівнює сумі ємностей одиночних акумуляторних батарей, що входять до неї.» [16].

«Енергоємність акумуляторної батареї сонячної електростанції визначається як»: [16]

$$W = C_n U_n . \quad (2.21)$$

Число послідовно включених одиничних акумуляторних батарей в ланцюг:

$$n = \frac{U_n}{U_{аб}}, \quad (2.22)$$

де $U_{аб}$ напруга окремої акумуляторної батареї.

Число паралельних ланцюгів в акумуляторній сонячної електростанції визначається за наступною формулою:

$$m = C_n / C_{аб}, \quad (2.23)$$

де $C_{аб}$ – ємність окремої акумуляторної батареї.

«Загальна кількість батарей в акумуляторній батареї сонячній станції відповідає наступному виразу:» [16].

$$N = n \cdot m. \quad (2.24)$$

Підставивши у рівняння (2.24) рівняння (2.20-2.23) отримаємо відношення для визначення загального числа одиничних акумуляторних батарей, що входять в акумуляторну батарею у вигляді:

$$N = \frac{100}{S_p} \cdot \frac{P_n}{W_{аб}} \Delta t_{нв}. \quad (2.25)$$

де « $W_{аб} = C_{аб} U_{аб}$ – енергоємність окремої акумуляторної батареї». [16]

Вибравши акумулятор необхідної ємності з рівнянь (2.20) і (2.23), можна скласти вираз визначення напруги акумуляторної батареї у вигляді:

$$U_H = \frac{100}{S_p} \cdot \frac{P_H}{mC_{аб}} \Delta t_{нв}. \quad (2.26)$$

У випадку навантаження сонячної електростанції непостійна, тобто змінюється у часі. «Зміна навантаження на інтервалі нічного часу доби (з 16:00 до 8:00) можна апроксимувати графіком, представленим на рис. 2.7. Для спрощення графіка навантаження представлена двома значеннями $P_{H1} = 1863$ Вт і $P_{H2} = 600$ Вт на п'ять інтервалів часу». [16] Поєднуючи представлені на графіку (рис. 2.7) інтервали часу з однаковими значеннями навантажень, отримуємо двоступінчастий графік зміни навантаження (рис. 2.8, а).

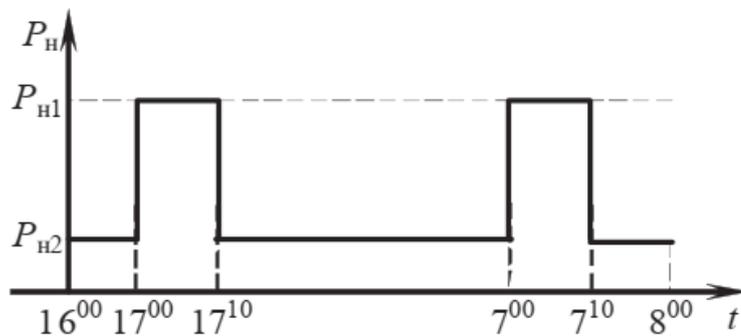


Рисунок 2.7. Спрощений графік зміни навантаження

Інтервали часу Δt_1 та Δt_2 , визначені як сума інтервалів часу із навантаженням P_{H1} і P_{H2} , відповідно, дорівнюють $\Delta t_1 = 1/3$ год та $\Delta t_2 = 15 \cdot 2/3$ год.

«Графік зміни ємності акумуляторної батареї сонячної електростанції при двоступінчастому навантаженні наведений на рис. 2.8, б.» [16].

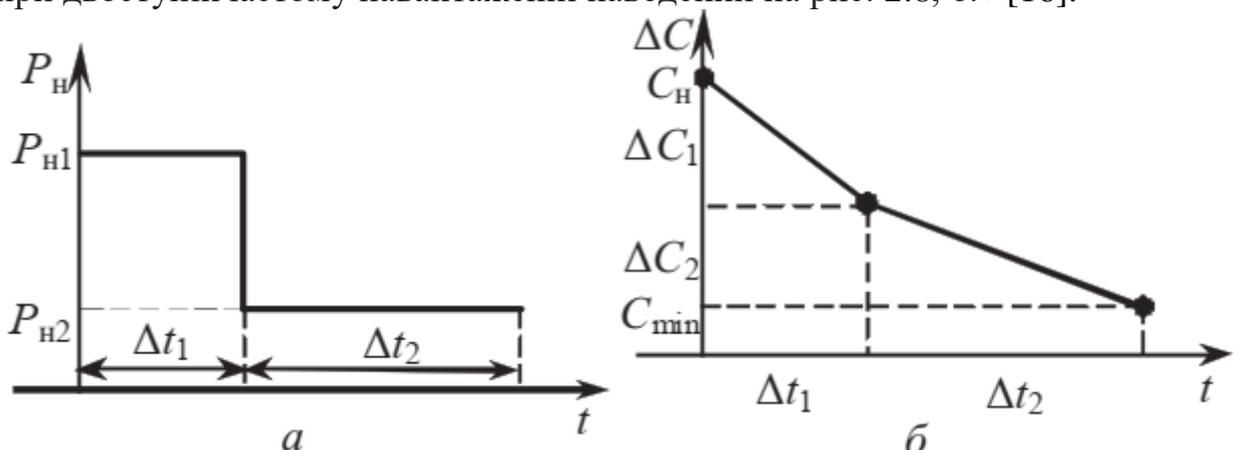


Рисунок 2.8. Зміна навантаження (а) та ємності (б)

На першому інтервалі часу витрата ємності акумуляторної батареї визначається як:

$$\Delta C_1 = \frac{P_{H1}}{U_H} \cdot \Delta t_1, \quad (2.27)$$

а на другому -

$$\Delta C_2 = \frac{P_{H2}}{U_H} \cdot \Delta t_2. \quad (2.28)$$

«Враховуючи, що $\Delta C = \Delta C_1 + \Delta C_2$, із (2.19), (2.27) та (2.28) одержуємо вираз для визначення необхідної ємності акумуляторної батареї автономної сонячної електростанції у вигляді:» [16].

$$C_n = \frac{100}{s_p U_H} \cdot (P_{H1} \Delta t_1 + P_{H2} \Delta t_2). \quad (2.29)$$

Безперечно, що розрахунок за рівнянням (2.29) дає підвищену необхідну ємність акумуляторної батареї. Для більш точного визначення необхідної ємності необхідно якомога точніше врахувати зміну графіка навантаження на нічному інтервалі часу доби.

2.5. Розрахунок потужності основної шини та автономних інверторів напруги сонячної електростанції

«Споживачі електричної енергії та акумуляторна батарея сонячної станції живляться через основну шину. Для необхідного правильного вибору перерізу основної шини та з метою визначення потужності сонячних батарей необхідно розрахувати пропускну потужність основної шини, яка визначається як сума потужностей навантаження та заряду акумуляторної батареї:» [16]

$$P_{ш} = P_H + P_{зп} / \eta_{ккд зп}, \quad (2.30)$$

де P_H – потужність навантаження сонячної електричної станції;

$P_{зп}$ – потужність зарядного пристрою сонячної електричної станції;

$\eta_{ккд зп}$ – ККД зарядного пристрою сонячної електричної станції.

Коефіцієнт корисної дії сонячної електричної станції визначається на наступним виразом:

$$\eta = \frac{P_H \eta_{ккд зп} \eta_1}{P_H \eta_{ккд зп} + P_{зп}}, \quad (2.31)$$

η_1 – ККД імпульсного перетворювача постійної напруги знижувального типу.

Вибір автономних інверторів напруги сонячної електричної станції. Необхідно поррахувати все сумарне навантаження приладів, що

підключаються до інвертора, і збільшити щонайменше на 30% отриману потужність.

2.6. Висновки по другому розділу

В даному розділі кваліфікаційної роботи обґрунтована дослідна установка, яка складається з наступних компонентів: 2 полікристалічні панелі «KDM 100 Вт / 12 В KD-P100», 2 монокристалічні панелі «JA Solar JAM54D40-455/LB», контролер Tracer-2210A, MPPT 20A 12/24В, інвертор Must Power PV18-3224 PRO, АКБ «LPM-MG 12V - 40 Ah» та навантаження різних типів, що дозволяє ефективно змодельовати та досліджувати основні режими роботи сонячної електричної системи.

Розроблено методику розрахунку потужності сонячної електростанції та її елементів, що дозволяє враховувати зміну навантаження протягом доби.

Облік зміни графіка навантаження на інтервалі нічної доби дозволяє точно визначити необхідну ємність акумуляторної батареї. Вираз визначення необхідної ємності акумуляторної батареї сонячної електростанції може бути легко узагальнено будь-якого числа змін сходів графіка навантаження.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

3.1. Дослід режиму холостого ходу

Першим із розглянутих режимів роботи сонячної електричної станції буде режимом холостого ходу сонячних панелей. В даному випадку фіксується залежність значення напруги на шинах модулів (В) від значення освітленості (люкс).

Хід проведення досліду:

- 1) подаємо живлення на стенд через автомат SF1;
- 2) підключаємо живлення вимірювальних приладів через SA33;
- 3) підключаємо живлення прожектора сонячної панелі GB3 через SA31 і прожектор сонячної панелі GB4 через SA32. Необхідно переконатися у справній роботі вентиляції (індикатори «Вентиляція GB3» та "Вентиляція GB4" повинні світитися зеленим кольором);
- 4) тумблер SA3 сонячної панелі GB3 переводимо в положення "ON" (ввімкнено). Тумблер SA4 сонячної панелі GB4 переводимо в положення "ON" (ввімкнено);
- 5) вмикамо люксметри, розташовані на сонячних шафах панелей. Діапазон необхідний для вимірювань «200» та «2000»;
- 6) ампер-вольтметри PV3-PA3 та PV4-PA4 починають показувати поточні значення напруги на сонячних панелях GB3 та GB4;
- 7) за допомогою димера регулюємо напругу на прожекторі. Зі зміною ступеня освітленість сонячної панелі змінюються показання вольтметра;
- 8) за допомогою люксметра проводимо вимірювання ступеня освітленості сонячної панелі. Будуємо залежність напруги холостого ходу від ступеня освітленості сонячних панелей GB3 та GB4.
- 9) після завершення експерименту відключаємо SA3, SA4, SA31, SA32, SA33 та SF1.

Результати проведених дослідів занесені до табл. 3.1, схема досліду представлена на рис. 3.1, 3.2.

Таблиця 3.1. Результати вимірювання досліду режиму холостого ходу

Освітленість,ЛК	14,52	23,13	33,75	45,41	120,17	201,45	690,47	2200	4350
U_{GB3} , В	2,51	10,81	11,35	12,71	15,24	16,15	17,68	18,74	19,31
U_{GB4} , В	4,21	9,72	11,46	13,11	16,232	17,41	18,53	19,81	21,01

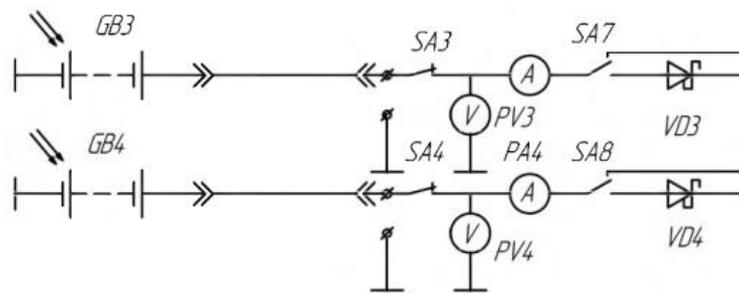


Рисунок 3.1. Схема досліду режиму холостого ходу

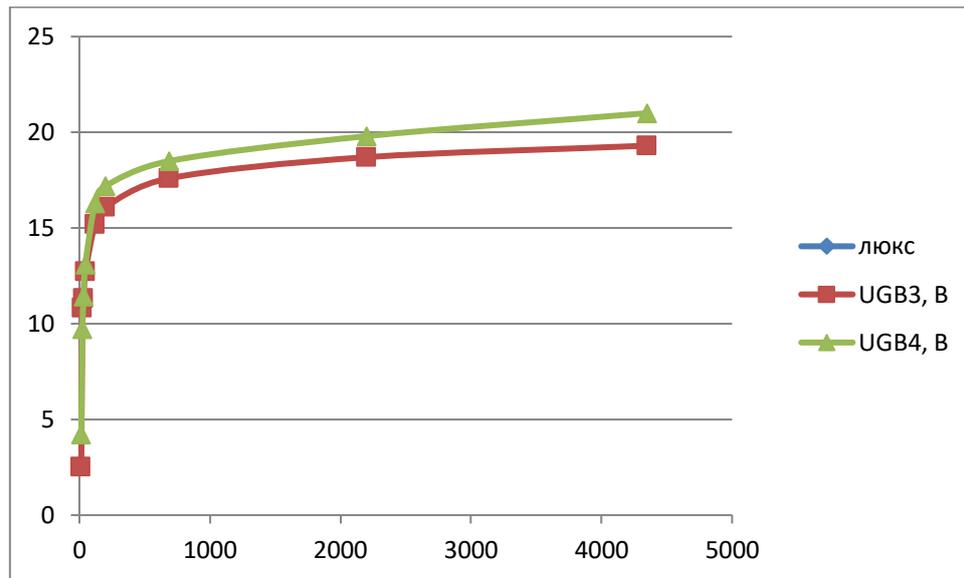


Рисунок 3.2. Графіки залежностей напруги холостого ходу сонячних панелей від рівня освітленості

За результатами даного досліду можна сформулювати кілька висновків. Як видно з таблиці, на низьких рівнях освітленості полікристалічна панель швидше набирає напруги, проте на відмітці порядку 40 лк напруги на клеммах монокристалічної та полікристалічній панелях вирівнюється, після чого спостерігається прискорене зростання напруги холостого ходу вже на монокристалічній панелі.

Також слід зазначити, що при високих значеннях освітленості напруга холостого ходу на панелях перевищує значення 19,3-21,0 В значення перевищують допустиму межу напруги інвертора, що призводить до переривання роботи даного елемента, а на індикаційному екрані висвічується відповідне попередження. Таким чином, для запобігання цьому режиму, а також запобігання закипанню електроліту акумуляторної батареї необхідно встановлення контролера або керування процесом заряду акумулятора у ручному режимі.

3.2. Дослідження режиму паралельної роботи сонячних панелей

Виходячи з особливостей конструкції установки, напруга на сонячних панелях GB1 та GB2 залежить тільки від рівня природної освітленості. Така освітленість не дозволяє модулям досягти у своїй роботі номінальних показників та брати участь у процесі виробництва електроенергії. Більше того, при високих значеннях освітленості панелей GB3 і GB4 полікристалічна панель GB1, не отримуючи достатнього рівня освітлення, сама починає споживати електричну енергію, що свідчить наявність струмів витоку.

Тому під час проведення досліду паралельної роботи фіксується залежність значення напруги на шинах модулів GB3 та GB4 (В) від значення освітленості (люкс), а також значення струмів витоку з даних модулів.

Хід проведення досліду:

- 1) подаємо живлення на стенд через автомат SF1;
- 2) підключаємо живлення вимірювальних приладів через SA33;
- 3) підключаємо живлення прожектора сонячної панелі GB3 через SA31 та прожектор сонячної панелі GB4 через SA32. Необхідно переконатися у справній роботі вентиляції (індикатори «Вентиляція GB3» та "Вентиляція GB4" повинні світитися зеленим кольором);
- 4) тумблер SA1 сонячної панелі GB1 переводимо в положення "ON" (ввімкнено). Тумблер SA2 сонячної панелі GB2 переводимо в положення "ON" (ввімкнено). Тумблер SA3 сонячної панелі GB3 переводимо в положення "ON" (ввімкнено). Тумблер SA4 сонячної панелі GB4 переводимо у положення «ON» (ввімкнено);
- 5) вмикаємо люксметри, розташовані на сонячних шафах панелей. Діапазон необхідний для вимірювань «200» та «2000»;
- 6) ампер-вольтметри PV1-PA1, PV2-PA2, PV3-PA3 та PV4-PA4 починають показувати поточні значення напруги на сонячних панелях GB1-GB4;
- 7) за допомогою димера регулюємо напругу на прожекторі. Зі зміною ступеня освітленість сонячної панелі змінюються показання вольтметра та амперметра;
- 8) за допомогою люксметра проводимо вимірювання ступеня освітлення сонячної панелі. Будуємо залежність напруги холостого ходу та відповідних струмів витоку від ступеня освітленості сонячних панелей GB3 та GB4;
- 9) після завершення досліду відключаємо SA1-SA4, SA31, SA32, SA33 та SF1.

Результати проведених дослідів занесені до табл. 3.2, схема та графік дослідів представлена на рис. 3.3 та 3.4.

Таблиця 3.2. Результати вимірювань дослідів холостого ходу

Освітленість, люкс	5	1000	2000	3000	4000	7200	10200	18000	31000
U_{GB3} , В	2,5	10,8	11,3	12,7	15,2	16,1	17,6	18,7	19,3
I_{GB3} , А	0	0,14	0,17	0,18	0,19	0,25	0,31	0,39	0,51
U_{GB4} , В	4,2	9,7	11,4	13,1	16,3	17,2	18,5	19,8	21,0
I_{GB4} , А	0	0,13	0,15	0,22	0,26	0,37	0,44	0,54	0,60

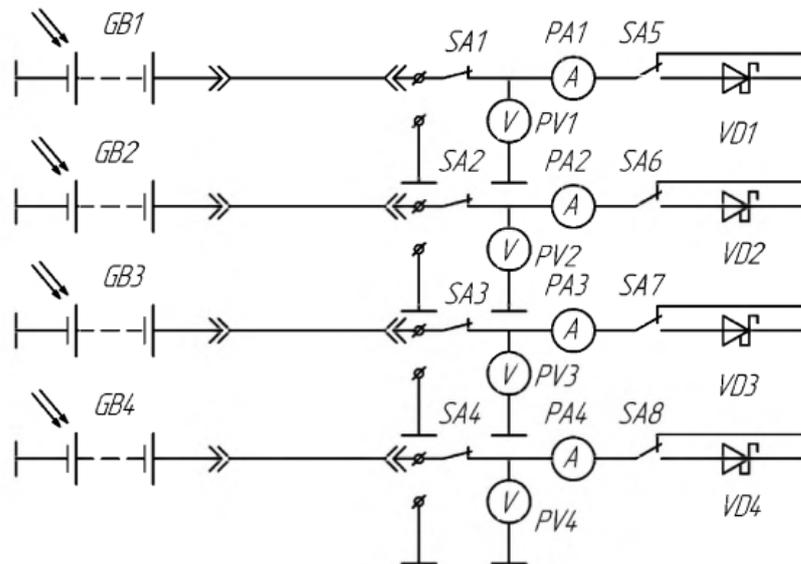


Рисунок 3.3 Схема досвіду паралельної роботи панелей

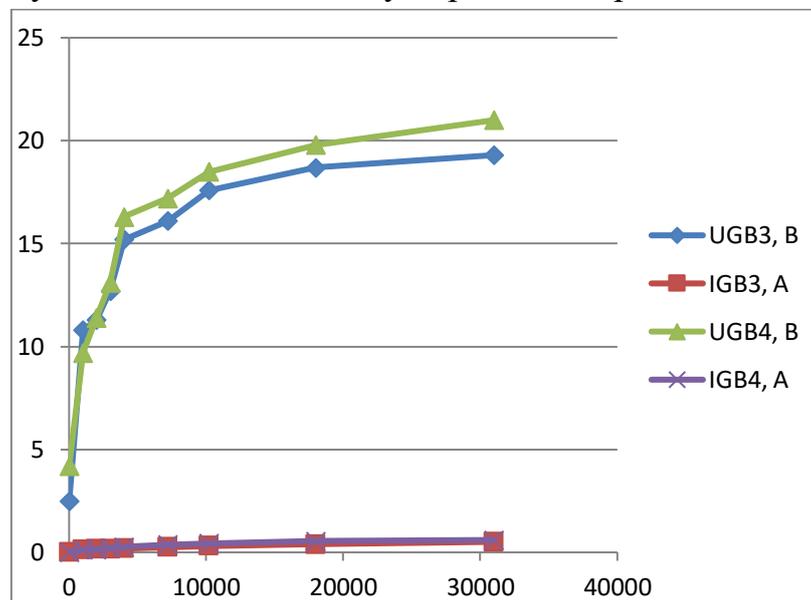


Рисунок 3.4. Графіки залежностей напруги сонячних панелей при паралельній роботі на холостому ході та залежностей струму витоку сонячних панелей від рівня освітленості

Виходячи з даних, зазначених у табл. 3.2, та графіку залежностей можна сформулювати висновок, що слабо освітлена полікристалічна панель

дійсно виступає як споживач електричної потужності Струми витоку порівняно невеликі і представляють близько 0,05% від номінальних струмів панелей, а тому у масштабі даної установки цими значеннями можна знехтувати. Однак на більших сонячних електричних станціях з великою кількістю панелей більшої потужності дані струми можуть істотно впливати на вироблення електроенергії.

3.3. Дослідження режимів заряду акумуляторів сонячними панелями

У ході наступного дослідження встановлюється залежність напруги на клеммах панелей, струму заряду АКБ та видачі потужності сонячними панелями від рівня освітленості.

Хід проведення дослідження:

- 1) подаємо живлення на стенд через автомат SF1;
- 2) підключаємо живлення вимірювальних приладів через SA33;
- 3) підключаємо живлення прожектора сонячної панелі GB3 через SA31 і прожектор сонячної панелі GB4 через SA32. Необхідно переконатися у справній роботі вентиляції (індикатори «Вентиляція GB3» та "Вентиляція GB4" повинні світитися зеленим кольором);
- 4) тумблер SA3 сонячної панелі GB3 переводимо в положення "ON" (ввімкнено). Тумблер SA4 сонячної панелі GB4 переводимо в положення "ON" (ввімкнено);
- 5) включаємо люксметри, розташовані на сонячних шафах панелей. Діапазон необхідний для вимірювань «200» та «2000»;
- 6) ампер-вольтметри PV3-PA3 та PV4-PA4 починають показувати поточні значення напруги на сонячних панелях GB3 та GB4;
- 7) переводимо перемикач SA9 значення «В обхід контролера».
- 8) підключаємо АКБ за допомогою пакетного перемикача SA10;
- 9) за допомогою димера регулюємо напругу на прожекторі. Зі зміною ступеня освітленості сонячної панелі змінюються показання вольтметра та амперметра;
- 10) за допомогою люксметра проводимо вимірювання ступеня освітлення сонячної панелі. Будуємо залежність напруги, струму заряду АКБ та потужності заряду АКБ панелями від ступеня освітленості сонячних панелей GB3 та GB4;
- 11) після завершення дослідження відключаємо SA3, SA4, SA10, SA9, SA31, SA32, SA33 h SF1.

Результати проведених дослідів занесені до табл. 3.3, графіки досліду представлена на рис. 3.5-3.7.

Таблиця 3.3. Результати вимірювань досліду заряду АКБ

Освітленість, люкс	2600	3450	6500	9800	14000	18500	24000	28000	31000
U_{GB3}, B	12,58	12,60	12,62	12,64	12,68	12,70	12,72	12,74	12,76
U_{GB4}, B	12,59	12,62	12,65	12,68	12,71	12,73	12,75	12,78	12,81
I_{GB3}, A	0,24	0,29	0,38	0,47	0,61	0,74	0,87	0,97	1,05
I_{GB4}, A	0,27	0,33	0,51	0,70	0,85	1,07	1,28	1,51	1,58
P_{GB3}, B	2,73	3,52	4,86	6,25	7,58	8,92	10,01	11,87	13,41
P_{GB4}, B	3,34	,87	6,27	8,65	9,48	12,31	15,84	18,34	20,17

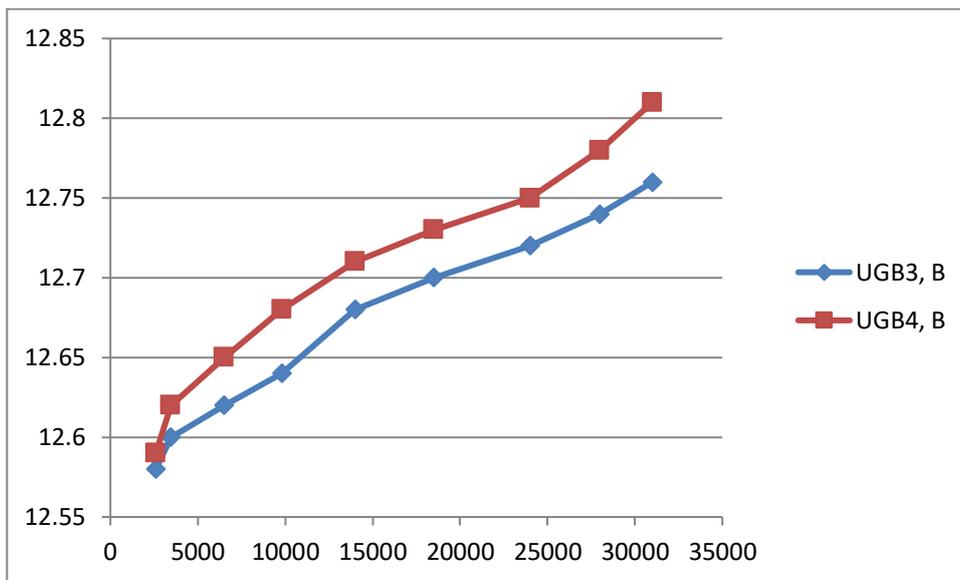


Рисунок 3.5. Графіки залежностей напруги від рівня освітленості

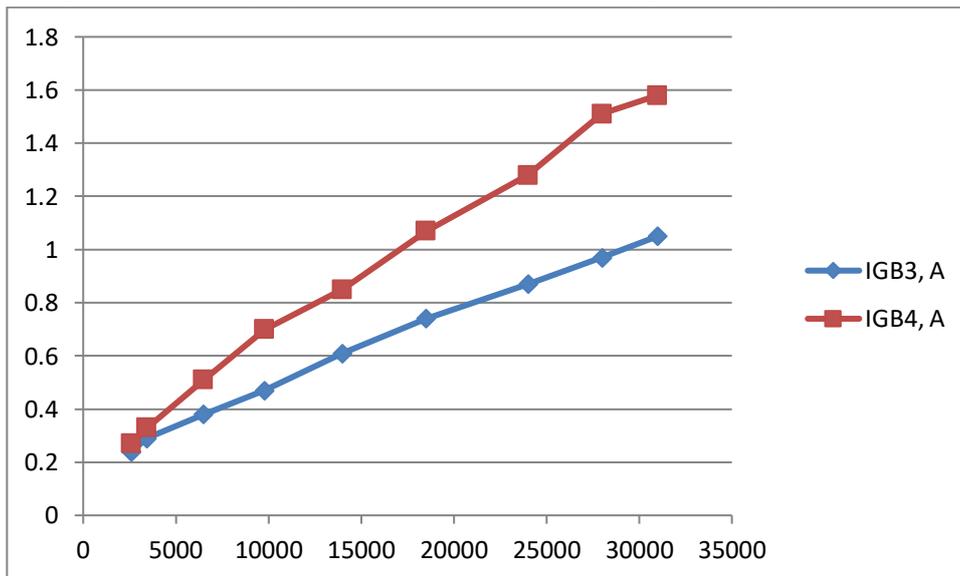


Рисунок 3.6. Графіки залежностей струму від рівня освітленості

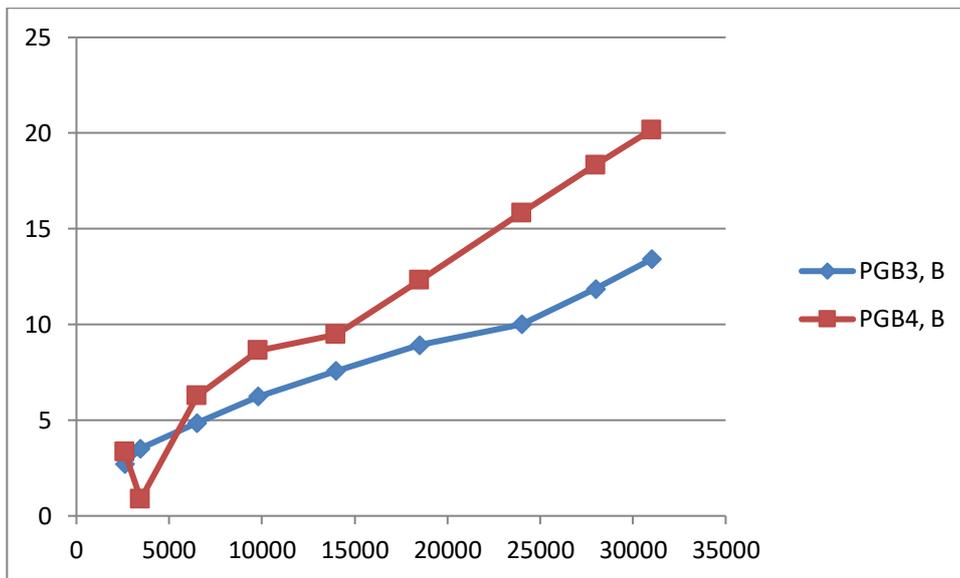


Рисунок 3.6. Графіки залежностей потужності заряду від рівня освітленості

На графіках досить яскраво відстежується тенденція показників: напруга, струм і, відповідно, зарядна потужність полікристалічної панелі перевищує аналогічні характеристики монокристалічної панелі. Зі збільшенням рівня освітленості різниця характеристик тільки зростає.

3.4. Дослідження навантажувальних характеристик

В рамках даного дослідження розглядається залежність напруги, струму навантаження і переданої потужності панелей від рівня освітленості в умовах активного та реактивного навантаження.

Хід проведення дослідження:

- 1) подаємо живлення на стенд через автомат SF1;
- 2) підключаємо живлення вимірювальних приладів через SA33;
- 3) підключаємо живлення прожектора сонячної панелі GB3 через SA31 і прожектор сонячної панелі GB4 через SA32. Необхідно переконатися у справній роботі вентиляції (індикатори «Вентиляція GB3» та "Вентиляція GB4" повинні світитися зеленим кольором);
- 4) тумблер SA3 сонячної панелі GB3 переводимо в положення "ON" (ввімкнено). Тумблер SA4 сонячної панелі GB4 переводимо в положення "ON" (ввімкнено);
- 5) включаємо люксометри, розташовані на сонячних шафах панелей. Діапазон необхідний для вимірювань «200» та «2000»;
- 6) ампер-вольтметри PV3-PA3 та PV4-PA4 починають показувати поточні значення напруги на сонячних панелях GB3 та GB4;

- 7) переключаємо перемикач SA9 значення «В обхід контролера»;
- 8) підключаємо АКБ за допомогою пакетного перемикача SA10;
- 9) тумблер SA12 переводимо у положення «ВКЛ». За допомогою кнопок SA19, SA20, SA21 підключаємо навантаження HL1, HL2, HL3 (люмінесцентні лампи потужністю 20Вт (кожна);
- 10) за допомогою димера регулюємо напругу на прожекторі. Зі зміною ступеня освітленість сонячної панелі змінюються показання вольтметра та амперметра;
- 11) за допомогою люксметра проводимо вимірювання ступеня освітлення сонячної панелі. Будуємо залежність напруги, струму навантаження та потужності від ступеня освітленості сонячних панелей GB3 та GB4;
- 12) за допомогою кнопок SA19, SA20, SA21 відключаємо навантаження HL1, HL2, HL3. За допомогою кнопки SA26 підключаємо навантаження HL8 (лампа розжарювання потужністю 60 Вт) і виконуємо аналогічні дії пунктів 10, 11;
- 13) після завершення дослідів відключаємо установку у зворотному порядку.

Результати проведених дослідів занесені до табл. 3.4 і 3.5, схема та графіки дослідів представлена на рис. 3.7, .

Таблиця 3.3. Результати вимірювань дослідів підключення активного навантаження

Освітленість, люкс	2600	3450	6500	9800	14000	18500	24000	28000	31000
U_{GB3} , В	12,43	12,48	12,51	12,55	12,64	12,71	12,74	12,78	12,82
U_{GB4} , В	12,41	12,44	12,47	12,49	12,54	12,57	12,61	12,63	12,65
I_{GB3} , А	0,28	0,34	0,50	0,64	0,83	1,25	1,35	1,47	1,58
I_{GB4} , А	0,21	0,25	0,37	0,48	0,64	0,78	0,92	1,03	1,09
P_{GB3} , В	3,37	4,17	6,27	8,66	9,54	13,01	16,14	18,44	20,21
P_{GB4} , В	2,74	3,42	4,79	6,47	7,51	9,77	11,62	12,83	13,58

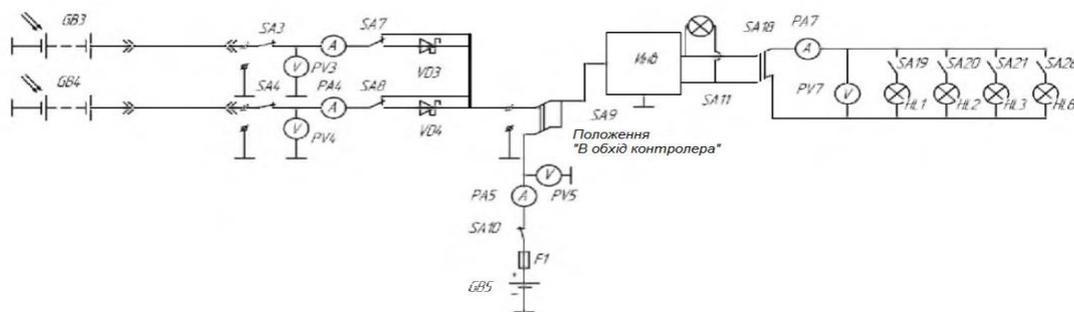


Рисунок 3.7. Схема дослідів підключення навантаження

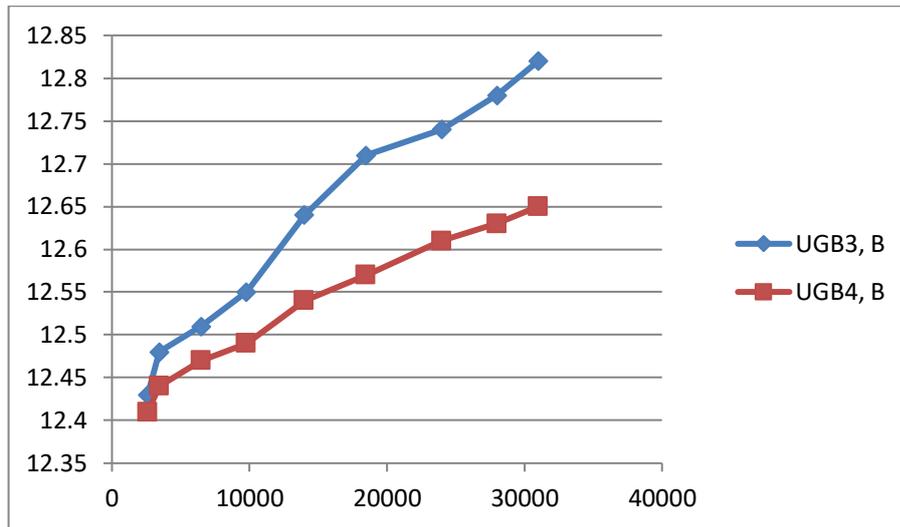


Рисунок 3.8. Графік залежностей напруги від рівня освітленості

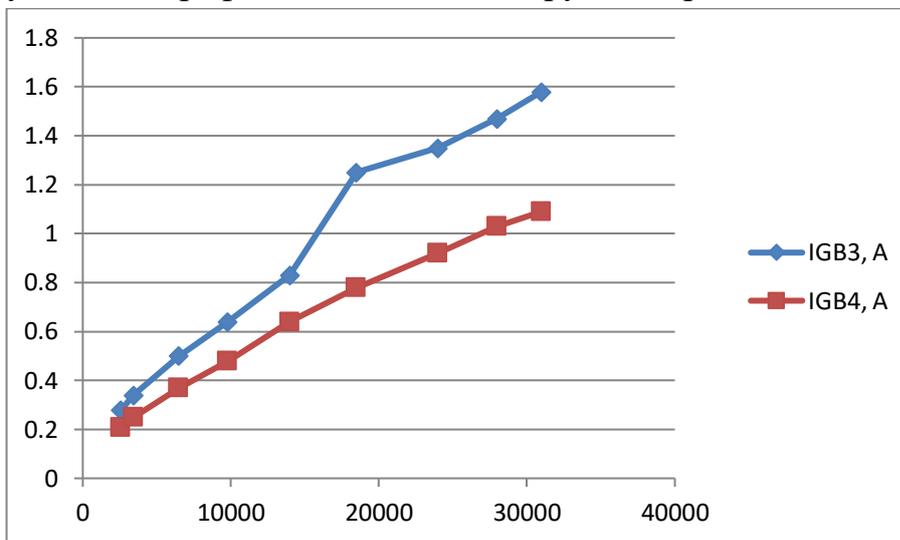


Рисунок 3.9. Графік залежностей струму від рівня освітленості

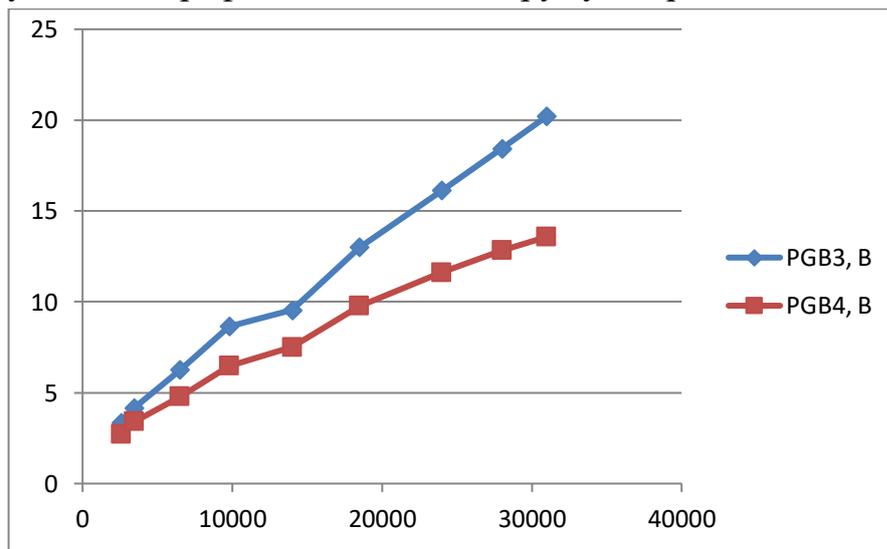


Рисунок 3.10. Графік залежностей потужності навантаження від рівня освітленості

З даних, отриманих під час досліду, випливає, що залежності аналогічні до попереднього досліду. Таким чином, полікристалічна панель показує кращі результати, ніж монокристалічна за таких же умов освітлення.

Крім того, сонячна панель працює в аналогічних режимах поза залежністю від підключеного навантаження або при роботі зарядження АКБ. Вона віддає максимальну потужність за відповідного рівня освітленості. Якщо потужність споживача перевищує генеровану потужність панелей, недолік покривається рахунок заряду АКБ.

3.5. Висновок по третьому розділу

В даному розділі кваліфікаційної роботи було проведено досліди режимів холостого ходу та паралельної роботи сонячних панелей, а також режимів заряду акумуляторів сонячними панелями.

З досліду холостого ходу випливає, що полікристалічна панель швидше набирає напругу на низьких рівнях освітленості, але після 40 лк зростання напруги вище у полікристалічній панелі.

Слабо освітлена полікристалічна панель споживає електроенергію: струми витоку становлять близько 0,05% від номінальних струмів панелей.

Крім того, у всіх режимах напруга, струм і потужність полікристалічної панелі перевищує аналогічні характеристики монокристалічної панелі. Зі збільшенням рівня освітленості в діапазоні від 100 до 32000 лк різниця характеристик зростає.

ВИСНОВОК

В даній кваліфікаційній роботі було наведено перспективи та особливості роботи сонячних електричних станцій. Розглянути переваги та недоліки роботи сонячних фотоелектричних станцій.

Наведено основні елементи системи електропостачання на базі сонячних панелей: сонячні панелі, контролери, інвертори та акумуляторні батареї.

Здійснено дослідження моделювання роботи сонячної електричної станції за допомогою дослідницької установки, що дозволило зробити порівняння технічних характеристик монокристалічних та полікристалічних панелей у різних режимах роботи, а також дослідити режими роботи елементів автономної системи електропостачання на основі сонячних панелей.

Було проведено дослідження різних режимів роботи монокристалічних та полікристалічних сонячних панелей і був сформовано перелік рекомендацій щодо виконання розрахунків при моделюванні роботи елементів автономної системи електропостачання на основі сонячних панелей.

Обробка результатів дослідів показала більш високу ефективність полікристалічної панелі в умовах, що створюються дослідницькою установкою, але, в той же час, недолік освітленості не дозволяє полікристалічній панелі працювати в режимі генерації, змушуючи її споживати електричну потужність, про що свідчать струми витоку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сонячні системи на основі термічних і фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії / А. В. Дорошенко, М. А. Глауберман, Я. І. Лепіх, А. П. Балабан // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. 2020. № 3. С. 40–50.
2. Вступ до спеціальності. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: Курс лекцій/ С.О. Кудря, В.І. Бudyко. К.: НТУУ «КПІ», 2013. 387 с.
3. Лежнюк П.Д. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик. Вінниця : ВНТУ, 2014. – 204 с. – ISBN 978-966-641-577-9.
4. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії/ Під заг. ред. А.К. Шидловського. – К.: «Українські енциклопедичні знання», 2007. – 559 с
5. Бондаренко Д. В. Еквівалентні схеми акумуляторів електроенергії, які підключені до сонячних фотоелементів / Д. В. Бондаренко // Відновлювана енергетика. 2019. № 3. С. 30–34.
6. Медиковський М.О. Дослідження режимів управління енергодинамічними процесами в системах електропостачання за наявності акумуляюючих елементів / Медиковський М.О., Кравчишин В.С., Мельник Р.В., Шуневич О.Б. // Науковий вісник НЛТУ України, 2016. т. 26, № 7 С. 291 – 298.
7. Комбіновані фотоенергетичні системи : [монографія] / Р. В. Зайцев, Г. С. Хрипунов, М. В. Кіріченко, А. В. Меріуц ; Нац. техн. ун–т "Харківський політехнічний інститут". Харків : [ФОП Бровін О. В.], 2020. 323 с.
8. Лежнюк П. Д. Фотоелектричні станції як елемент енергоефективного електропостачання / П. Д. Лежнюк, С. В. Кравчук, І. В. Котилко // Оптико електронні інформаційно–енергетичні технології. 2019. № 2. С. 100–106.
- 9 <https://solar-energy.com.ua/solnechnye-batarei/monokristallicheskaya-solnechnaya-panel-ja-solar-jam54d40-45.html>
10. <https://svoya-energy.com.ua/product/avtonomnyj-sonyachnyj-invertor-3-2-kvt-svoya-energiya-by-must-pv18-3224-pro/>
11. <https://www.powersol.com.ua/uk/product/csb-gp12400-12v-40ah-akumulyator-40ah-12v/>
12. <https://solar.biz.ua/kontroler-mppt-20a-12-24v-tracer2210a-epsolarepever/?srsltid=AfmBOoopXDAoAxEClytbknz5-28UUu2w1ThMxKi7VzrsFOi7jqoiHdSI>

13. Стаднік М. І. Гібридне електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії / М. І. Стаднік, Д. П. Проценко, С. М. Бабій // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2020. № 4. С. 32–41.

14. Фотоенергетика : навч. посібник / Ю. П. Колонтаєвський, Д. В. Тугай, С. В. Котелевець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 160 с.

15. Щербина О. Енергія для всіх. Технічний довідник з енергоощадності та відновних джерел енергії. Ужгород., 2007. 336 с.

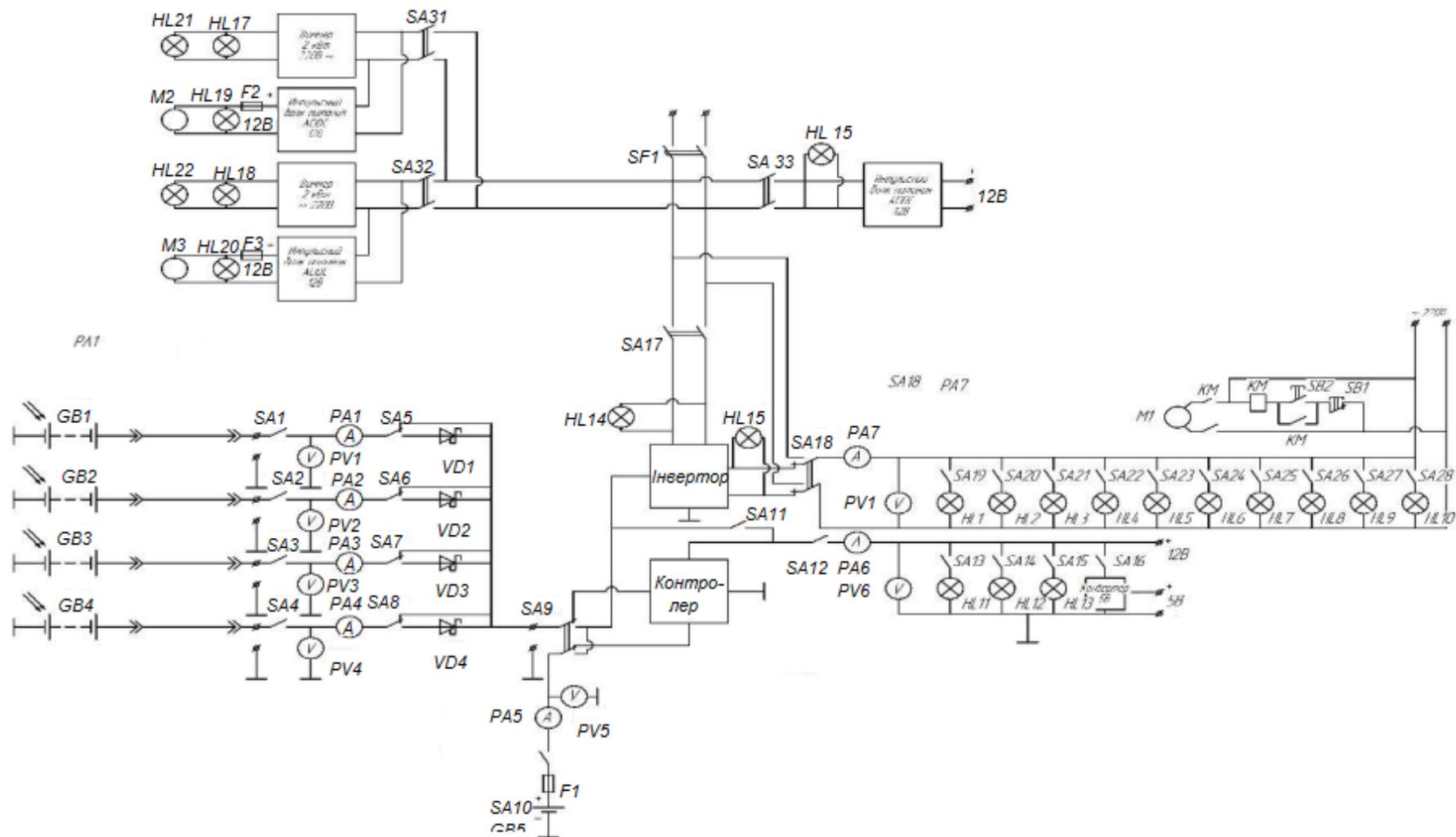


Рисунок 1. Принципова електрична схема установки