

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
Центр перепідготовки та післядипломної освіти  
Кафедра електричної інженерії

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: «**РОЗРОБКА АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ  
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДОСЛІДНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ НАВЧАЛЬНОГО  
КОРПУСУ №7 ТНТУ ім. І. ПУЛЮЯ**»

Виконав: студент II курсу, групи ЕЕд-2,  
спеціальності

141 – Електроенергетика, електротехніка  
та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Луцик Артур Петрович

(прізвище та ініціали)

Керівник Оробчук Б.Я.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Вакуленко О.О.

(прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Тернопіль – 2021 рік

## Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Центр перепідготовки та післядипломної освіти

Кафедра Електричної інженерії

Освітньо-кваліфікаційний рівень - магістр

Галузь знань 14 – «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

Електричної інженерії

**д.т.н., проф. Тарасенко М.Г.**

“01” вересня 2021 року

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Луцику Артуру Петровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Розробка автономної системи електропостачання дослідної лабораторії навчального корпусу №7 ТНТУ ім. І. Пулюя»

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

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 28 червня 2021 р. № 4/7-693

2. Строк подання студентом роботи - грудень 2021 року

3. Вихідні дані до роботи: Виконати дослідження та аналіз існуючих автономних систем генерації електричної енергії; розробити функціональну схему сонячної автономної установки зі слідкуючою системою за Сонцем та регулюванням потужності сонячних панелей; розробити алгоритм роботи зворотного зв'язку для сонячної автономної установки зі слідкуючою системою за Сонцем; виконати практичне впровадження розробленої автономної сонячної енергетичної установки для потреб дослідної лабораторії кафедри електричної інженерії.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунково-дослідницький розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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

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

2. Графіки залежностей дослідження вибору складових сонячної установки

3. Схема автономної сонячної установки для дослідної лабораторії

4. Функціональна схема сонячної автономної установки

5. Навантаження автономної системи електропостачання і її характеристики

6. Практична реалізація автономної сонячної установки

7. Загальні висновки до дипломної роботи

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Гурик О.Я., к.т.н., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Вакуленко О.О., ст. викладач</i>		

7. Дата видачі завдання - вересень 2021 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<i>Аналітичний розділ</i>		
2	<i>Проектно-конструкторський розділ</i>		
3	<i>Розрахунково-дослідницький розділ</i>		
4	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>		
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>		
6	<i>Оформлення графічної частини</i>		

Студент

Луцук А. П.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

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

## РЕФЕРАТ

Луцик А. П. Розробка автономної системи електропостачання дослідної лабораторії навчального корпусу №7 ТНТУ ім. І. Пулюя. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Центр перепідготовки та післядипломної освіти. Кафедра електричної інженерії, група ЕЕд-2. – Тернопіль: ТНТУ, 2021.

Стор. - 71; рис. - 34; табл. - 4; плакатів - 7; джерел – 43

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання розробки автономної системи електропостачання дослідної лабораторії навчального корпусу №7 ТНТУ ім. І. Пулюя та її практичне впровадження. Базовим джерелом є сонячні панелі і акумуляторні батареї, а резервним додатковим джерелом – централізована система електропостачання.

У пояснювальній записці кваліфікаційної роботи розглянуто способи підвищення ефективності сонячних установок та їх аналіз на базі слідкуючих систем за Сонцем. Запропоновано методику розрахунку автономних сонячних установок, розроблено конструкцію автономної сонячної установки, побудовано її функціональну схему, проведено експериментальні дослідження побудованої установки та розроблено алгоритм роботи зворотного зв'язку.

**Ключові слова:** автономна фотоелектрична енергетична установка; сонячна батарея; акумуляторна батарея; енергетична ефективність; регулювання потужності; автоматичне стеження за Сонцем.

## ABSTRACT

A. Lutsyk. Development of an autonomous of electricity supply system of research laboratory of the educational building № 7 of Ternopil Ivan Puluj National Technical University. 141 - Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics. Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Center for re-training and postgraduate education. Chair of Electrical Engineering, group ЕЕд-2. – Ternopil: TNTU, 2021.

Page – 71; Illustrations – 34; Tables – 4; Blueprints – 7; Sources – 43

The qualifying work considers the development of an autonomous of electricity supply system of research laboratory of the educational building № 7 of Ternopil Ivan Puluj National Technical University and its practical implementation. The basic source is solar panels and batteries, and the backup additional source is a centralized power supply system.

In the explanatory note of qualification work ways of increase of efficiency of solar installations and their analysis on the basis of tracking systems on the Sun are considered. The method of calculation of autonomous solar installations is offered, the design of the autonomous solar installation is developed, its functional scheme is constructed, experimental researches of the constructed installation are carried out and the algorithm of work of feedback is developed.

**Key words:** stand-alone photovoltaic power system; solar panel; battery; energy efficiency; power control; automatic tracking at the sun.

## ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	11
1.1 Аналіз перспектив використання сонячної енергії	11
1.2 Аналіз передумов розвитку сонячних установок	12
1.3 Способи підвищення ефективності сонячних установок	17
1.4 Аналіз сонячних установок з слідкуючими системами за Сонцем	22
1.5 Висновки до розділу	29
2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	30
2.1 Методика розрахунку автономних сонячних установок	30
2.2 Розрахунок та вибір інвертора	32
2.3 Розрахунок кількості акумуляторних батарей та вибір їх типу	34
2.4 Розрахунок кількості сонячних панелей та вибір їх типу	38
2.5 Розрахунок та вибір контролера	41
2.4 Висновки до розділу	43
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	44
3.1 Шляхи підвищення ефективності автономних сонячних установок	44
3.2 Розробка конструкції автономної сонячної установки	45
3.3 Розробка функціональної схеми сонячної установки	46
3.4 Експериментальні дослідження сонячної установки	49
3.5 Висновки до розділу	57
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	58
4.1 Аналіз шкідливих і небезпечних факторів, які можуть виникнути при монтажі й експлуатації сонячної установки	58
4.2 Розрахунок струму при одно- і двохполюсному дотику до струмопровідних частин сонячної установки	59
4.3 Заходи безпеки життєдіяльності для захисту працюючих	61
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	66
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	67

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Уже сьогодні населення планети усвідомлює необхідність використання відновлюваних джерел енергії, оскільки відчуває проблеми з викопним паливом та зростанням попиту на стабільне постачання енергії. Сонячну енергетику можна вважати одним із найперспективніших напрямків відновлюваної енергетики, так як вона є простою, доступною, має великий потенціал та здатна задовольнити зростаючий попит на енергію [1].

На даний час системи на фотоелектричній основі набирають все більшої популярності завдяки великому попиту на електроенергію і в зв'язку з доволі несуттєвим забруднення навколишнього середовища. Енергія Сонця вважається безкоштовною і нею достатньо забезпечені більшість країн нашої планети. Земля отримує від Сонця протягом півгодини настільки величезну і потужну кількість енергії, яка еквівалентна повній споживаній енергії всього світу [2]. Перевагою сонячної енергії є те, що вона виступає чистим і відновлюваним джерелом енергії без шкідливих газів та токсичних відходів під час її використання. Крім переваг ця система має і недоліки [3]:

- низький коефіцієнт корисної вироблення електроенергії (біля 15%);
- залежність від погодних умов.

Сучасні сонячні електростанції не генерують електроенергії вночі та є недостатньо ефективними під час ранкових та вечірніх сутінків. Варто зауважити, що найбільше електроспоживання припадає якраз саме на цей період. Недоліком цієї електростанції є те, що її потужність може різко і несподівано коливатися від зміни погоди.

Промисловість та користувачі використовують два види фотоелектричних станцій - мережеві та автономні [4]. Мережеві системи можуть подавати електроенергію як від відновлюваних джерел енергії, так і від промислової мережі, а це дозволяє монтувати системи різної потужності і у віддалених районах, і в

містах та котеджних поселеннях. Але в цьому випадку споживач змушений платити за електричну енергію при виборі цього типу фотоелектричної станції.

При відсутності мереж централізованого електропостачання зазвичай використовують автономні системи. В цьому випадку для забезпечення енергією в нічний час доби або в період відсутності сонячного випромінювання потрібно застосовувати акумуляторну батарею. Найбільше застосування автономні фотоелектричні системи знайшли для електропостачання окремих будинків та невеликих офісних приміщень. Малі автономні системи забезпечують живленням базове побутове навантаження, а більш потужніші системи можуть дозволяють жити електричні інструменти, холодильник, водяний насос і ін. До складу такої системи входять сонячні панелі, контролер заряду-розряду, акумуляторні батареї, кабелів, комутаційне обладнання та електричне навантаження. Основна перевагою автономних систем є незалежність від промислових мереж електропостачання та відсутність оплати за електричну енергію.

З метою підвищення показників енергозбереження та енергоефективності споживачі, а також зниження витрат на електроенергію за рахунок використання сонячної енергії в якості джерела живлення доцільно впроваджувати власні автономні системи електропостачання з живленням від сонячних панелей. Для підприємств малого і середнього бізнесу, навчальних закладів, тобто для споживачів з невеликим навантаженням, такі системи можуть бути найефективнішими. Результати цієї кваліфікаційної роботи можна використати при розробці автономних установок, альтернативних джерел енергії, що буде сприяти перспективі інтеграції із системами живлення.

Ще одним із способів підвищення ефективності сонячних установок за рахунок максимального використання отриманої сонячної енергії є використання слідкуючої системи, який дозволяє змінювати її просторову орієнтацію відносно Сонця. На даний час вплив просторової орієнтації сонячної установки на ефективність її роботи при урахуванні часових, географічних та кліматичних факторів немає достатніх досліджені. Підвищення ефективності сонячних



установок методом обґрунтування їх просторової орієнтації та впливу комплексних факторів є актуальною задачею сьогодення.

**Мета і завдання досліджень.** Метою кваліфікаційної роботи є розробка системи електропостачання дослідної лабораторії навчального корпусу №7 ТНТУ на основі фотоелектричних джерел енергії для підвищення енергоефективності та енергозбереження з перспективою її подальшої інтеграції в систему електропостачання всього корпусу.

Для досягнення мети поставлені та вирішені такі завдання:

- виконано аналітичне дослідження автономних систем електропостачання;
- розроблено структурну схему автономної сонячної установки;
- розроблено функціональну схему сонячної автономної установки зі слідкуючою системою за Сонцем та регулюванням потужності сонячних панелей;
- розроблено алгоритм роботи зворотного зв'язку для сонячної автономної установки зі слідкуючою системою за Сонцем;
- виконано практичне впровадження першого етапу розробленої автономної сонячної енергетичної установки для потреб дослідної лабораторії кафедри електричної інженерії ТНТУ ім. І. Пулюя.

**Об'єктом дослідження** є автономна сонячна електростанція на базі фотоелектричних модулів, акумуляторних батарей і допоміжного обладнання.

**Предметом дослідження** є система електропостачання дослідної лабораторії навчального корпусу на основі автономної сонячної електростанції.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в запропонованому підході щодо використання альтернативної енергії та обґрунтуванні технічної і економічної доцільності встановлення автономної сонячної електростанції, що дозволить підвищити ефективність енергозабезпечення дослідної лабораторії окремого навчального корпусу.

**Практичне значення одержаних результатів роботи.** Практична значимість результатів, отриманих в кваліфікаційній роботі, полягає у тому, що встановлення та експлуатація автономної сонячної електростанції в структурі енергозабезпечення навчального корпусу №7 Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя дозволить зменшити споживання електричної енергії та викидів вуглекислого газу в оточуюче середовище.

Приведені в кваліфікаційній роботі результати досліджень та розроблена автономна система електропостачання можуть бути впроваджені в лабораторну практику навчального процесу кафедри електричної інженерії Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя.

#### **Апробація результатів магістерської роботи.**

Основні положення роботи і її результати доповідалися на VII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 24-25 листопада 2021 р. (м. Тернопіль).

#### **Публікації.**

За результатами виконаних досліджень опубліковано 1 тезу доповідей «Імітаційна модель автономної сонячної електростанції». Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 24–25 лист. 2021) // М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]: ТНТУ, 2021.

#### **Структура роботи.**

Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (43 найменування).

Загальний обсяг текстової частини: 71 сторінка, 4 таблиці, 34 рисунки.

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Аналіз перспектив використання сонячної енергії

За останнє десятиліття різко зросло використання енергії Сонця. Кожної секунди наше Сонце випромінює більше 100 ГДж теплоти, а Земля щоденно отримує біля  $4,2 \cdot 10^{14}$  кВт·год, в той час як все населення Землі на 2020 р. витрачає приблизно  $185 \cdot 10^{12}$  кВт·год на рік [5]. Отже, сонячна енергія, яку ми отримуємо, набагато перевищує наші енергетичні потреби. Як би людство використовувало тільки 0,013% отриманої від Сонця енергії, то забезпечило б усі потреби сьогодення світової енергетики. Варто відмітити, що розробка сонячних електростанцій стикається з деякими труднощами, які обмежують широку та масштабну реалізацію цієї технології.

Відповідно до планів Європейського стратегічного розвитку енергетики до 2020 року очікується, що в Європі більше 15% усієї необхідної електричної енергії будуть отримувати від Сонця, більше 20% - від вітру і ще біля 15% - від інших відновлюваних біоенергетичних джерел [6]. Уже зараз європейський консорціум, до якого входить 12 країн, планує побудувати в Сахарі потужні електричні станції, генеруюча мережа яких зможе забезпечити біля 15% потреб Європи в енергії на період до 2050 року.

Найбільше в Європі використовує сонячну енергію Німеччина, далі йде Туреччина а за нею розташувалася Греція. У Німеччині уряд стимулював встановлення сонячних панелей на дахах будинків, для чого розробив «сімейну програму з використання сонячної енергії» для державної підтримки приватних осіб, які будуть використовувати та акумулювати сонячну енергію. Наприклад, Японія планує у два рази знизити вартість сонячної енергії протягом 3-5 років з метою підвищення інтересу населення до її використання.

Доволі значних успіхів у сфері використання сонячної енергії вдалося досягнути Китаю. За останнє десятиліття Китай став лідером та найпотужнішим у світі виробником та користувачем сонячних концентраторів, сумарна площа яких

займає понад 80 млн. м<sup>2</sup> або 79% від світового показника, а в галузі сонячної енергії працює більше 160 млн. китайців. Лідером промислового виробництва сонячних систем в Китаї є Китайська корпорація геліоенергії «Ху а і мін», виробничі площі якої майже в три рази перевищують аналогічні показники країн Північної Америки. Загальна кількість впровадження сонячної енергії цією корпорацією за останні роки склала біля 5000 МВт, тобто вона зекономила більше 25 млн. т природного вугілля [7].

## 1.2 Аналіз передумов розвитку сонячних установок

Розвиток відновлюваних джерел енергії вважається одним із найперспективніших шляхів вирішення енергетичних та екологічних проблем і йому останніми роками приділяється все більше уваги, особливо активно ведуться роботи з розвитку сонячних установок, які напряму перетворюють сонячне випромінювання в електричну енергію.

Тут варто відмітити вагомий внесок у розвиток теорії та практики сонячної енергетики таких вчених як А.П. Ландсман, Н.С. Лідоренко, О.Ф. Іоффе, В.С. Вавілов, В.К. Субашієв, Ж.І. Алфьоров, В.С. Стребков, М. Вольф, Дж. Лоференський, М. Прінс, П. Рапопорта, Г. Раушенбах та багато ін. [8].

Практичне використання сонячних установок має ряд переваг:

- можна забезпечити електропостачання автономних споживачів на різну потужність;
- великий запас сонячної енергії, надійність та довговічність;
- повна автоматизація, відсутність шуму;
- екологічна чистота під час роботи.

З аналітичного аналізу бачимо, що з усіх відновлюваних джерел енергії найбільший енергетичний потенціал має сонячна енергія. Наприклад, тільки в Україні вона здатна забезпечити економію до 6 млн. тонн умовного палива щорічно, а технічно-досяжний потенціал становить 38,2 млрд. кВт·год/рік [9] (рис.1.1).

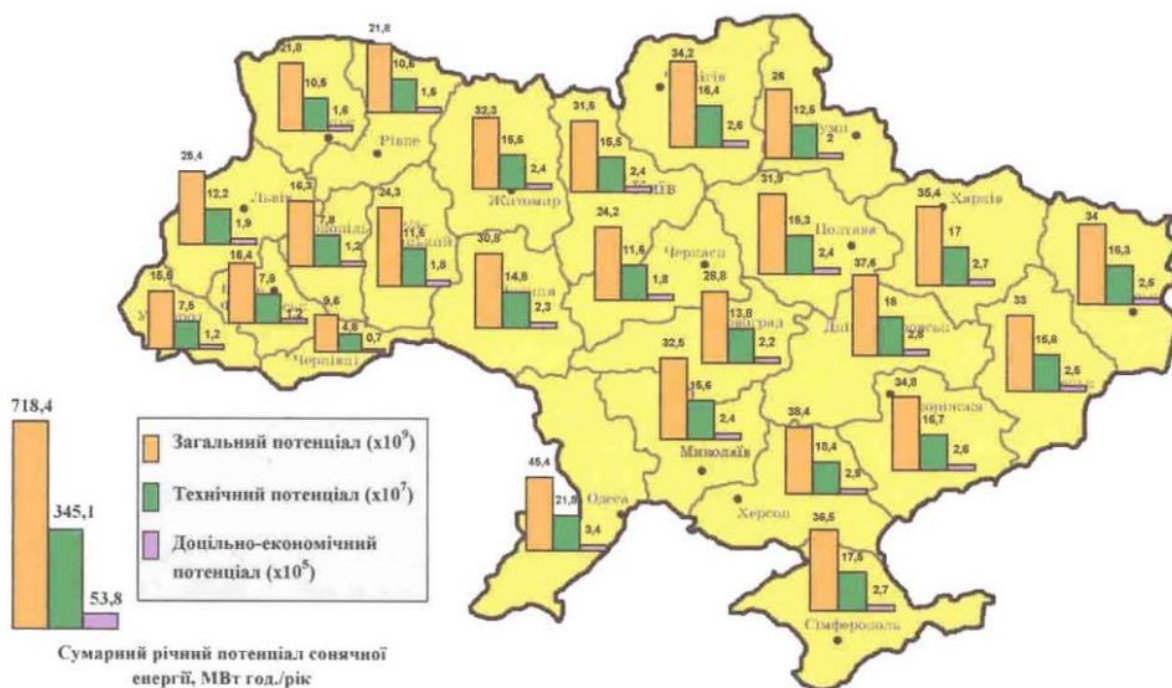


Рисунок 1.1 – *Потенціал сонячної енергії на території України*

Динаміка світового розвитку установок на базі відновлюваних джерел енергії засвідчила, що найбільш стрімким напрямком є сонячна енергетика (рис. 1.2). За останні десять років темпи щорічного зростання виробництва необхідних цього сонячних фотоелементів склади більше 30% [10].

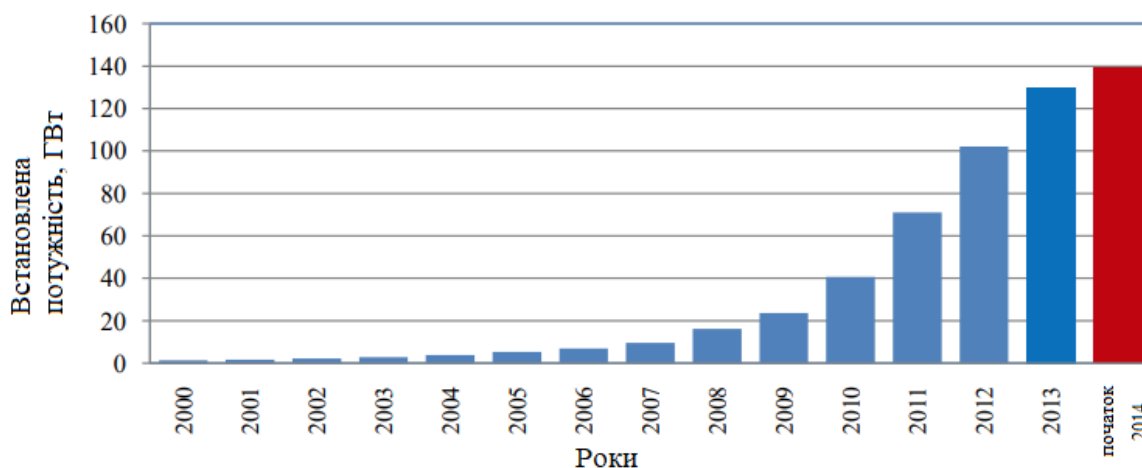


Рисунок 1.2 – *Світова динаміка росту потужності фотоелектричних станцій*

Відомо, що середньорічний потенціал енергії сонячного випромінювання в Україні є достатньо високим і становить  $1235 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ , що є набагато вище у порівнянні з такими країнами як Німеччина ( $1000 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ ), Польща ( $1080 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ ). Отже, Україна володіє достатніми сонячними енергетичними ресурсами для ефективного використання сонячних установок на своїй території [11].

Але перешкодою для впровадження сонячних установок є декілька факторів, основним з яких є їх висока ціна та низький коефіцієнт корисної дії. Тому вченими всього світу, і українськими в тому числі, розробляються шляхи зниження впливу цих факторів з метою подальшого розвитку сонячної енергетики. Це можна побачити і на стрімкому зниженні питомої вартості кремнієвих сонячних панелей (табл. 1.1) [21].

Таблиця 1.1 - Середня питома вартість кремнієвих сонячних панелей

Роки	1 950	1 960	1 970	1 980	1 990	2 000	2 010	2 015- 2020
Питома вартість, \$/Вт	1 000	5 00	1 00	2 0	1 0	6	4	3

На даний час в активній фазі знаходяться роботи що зниження загальної вартості сонячних установок методом їх технологічного і технічного вдосконалення (рис. 1.3) [13], хоча ще ціна таких установок і отриманої з їх допомогою електричної енергії на сьогодні є доволі високою.

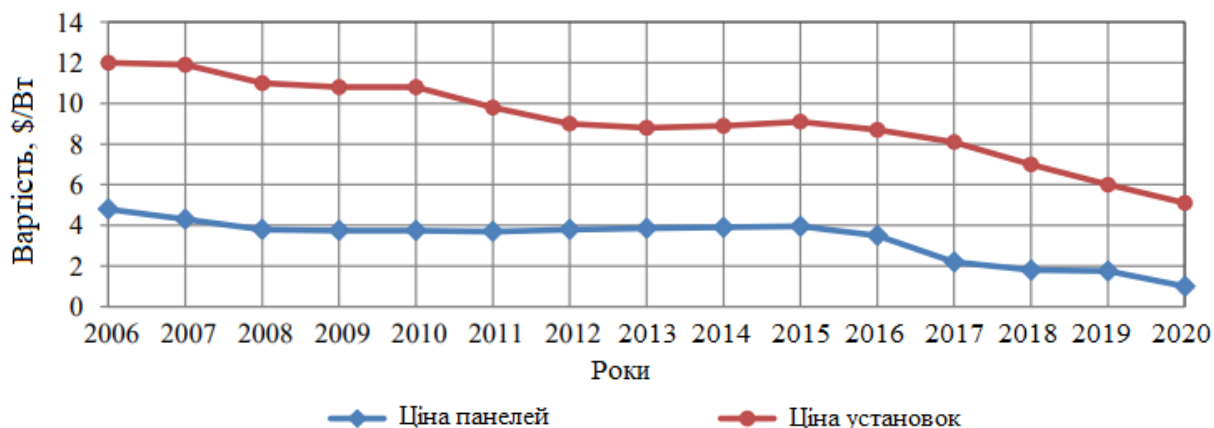


Рисунок 1.3 – Світова динаміка питомої ціни сонячних установок та сонячних панелей за період з 2006 по 2020 р.

З графіка, показаного на рис. 1.3, бачимо, що зниження вартості сонячних панелей за зазначений період, є більш значним, ніж вартість сонячних установок в загальному. Отже, спостерігається тенденція і для подальшого зниження вартості сонячних елементів, і для зниження вартості окремих елементів сонячних установок, до яких входять системи перетворення та акумулювання отриманої електроенергії, опорні конструкції і ін.

Зараз інтенсивно проводяться роботи щодо підвищення коефіцієнта корисної дії сонячних елементів. На рис. 1.4 приведено динаміку росту ефективності напівпровідникових кремнієвих елементів за останні 40 років.

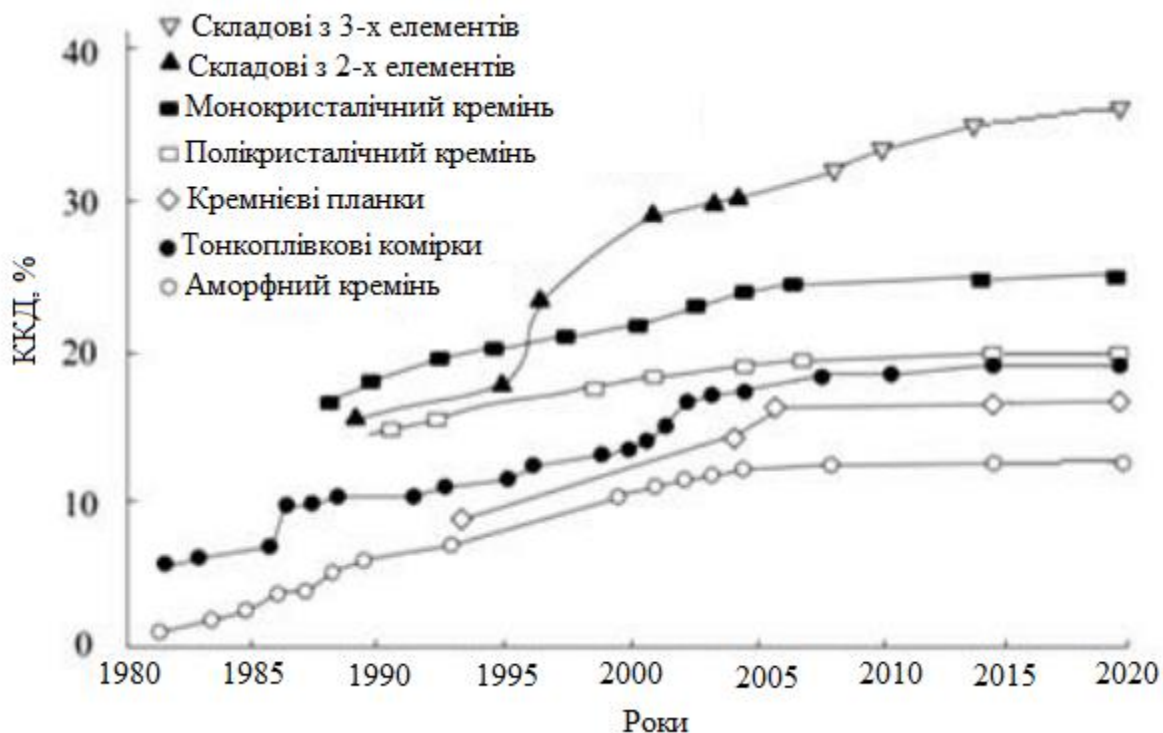


Рисунок 1.4 – Зростання ефективності кремнієвих сонячних елементів

Майже 100 років тому коефіцієнт корисної дії сонячних елементів ледь сягав 1%, а сьогодні коефіцієнт корисної дії сонячних елементів становить біля 20%. Уже відома модель сонячних елементів, максимальний коефіцієнт корисної дії яких у лабораторних умовах рівний майже 37%, але вартість таких елементів є доволі дорогою. Наприклад, практичний коефіцієнт корисної дії наземних каскадних сонячних елементів при стандартних умовах випробування досягає 45%, а теоретичний – 50% [14].

Сьогодні ми маємо тенденцію до зростання вартості традиційного палива, так як запаси копалин палив зменшуються, відповідно, їх вартість буде зростати. У цьому випадку розвиток сонячних установок стає доцільнішими, оскільки спостерігається зниження вартості сонячних елементів і збільшення їх коефіцієнта корисної дії, а ціни на електроенергію на базі традиційних енерго-ресурсів будуть зростати [15].

Використання сонячних установок у багатьох випадках є економічно оправданним, незважаючи на їх високу вартість. Зокрема, це стосується тих країн, які



мають значні території з розосередженими споживачами з децентралізованим енергопостачанням. В результаті перебоїв енергопостачання або ненадійного централізованого енергопостачання споживачі можуть зазнавати значних збитків.

Можна сказати, що існуючий на теперішній час підхід щодо визначення порівняльної економічної ефективності сонячних установок та установок на традиційному паливі, є спірним. Справа в тому, що цей підхід не враховує приховані витрати, які пов'язані з негативним впливом традиційної енергетики на здоров'я людей та на оточуюче середовище. В якості прикладу в більшості практичних випадків приводять тільки дуже малу частину тієї шкоди оточуючому середовищу та здоров'ю людей, що насправді наносить традиційна паливна енергетика.

Варто додати, що в перспективних планах розвитку електроенергетичної галузі України, де розглядається питання створення інтелектуальної адаптивної мережі (Smart Grid мережа) і місцевих мікромереж, збільшення числа використання відновлюваних джерел енергії, особливо енергії Сонця, надано значну увагу. Передбачається, що завдяки використанню відновлюваних джерел енергії можна вирішити питання зниження негативного навантаження на навколишнє середовище, зменшити недостачу та поліпшити якість електроенергії і підвищити надійність електропостачання, а також знизити ціну електроенергії для споживачів [16].

### **1.3 Способи підвищення ефективності сонячних установок**

Крім високої ціни та низького коефіцієнта корисної дії сонячних елементів перешкодою до активного впровадження сонячних установок є непостійність виробленої ними електроенергії, що пов'язано з тимчасовою зміною отримання сонячної радіації, її розсіянням, низькою густиною та постійною залежністю від умов кліматичного і географічного розміщення.

На сьогодні відомі наступні способи підвищення ефективності сонячних установок:

- впровадження прогресивних технологій розробки сонячних елементів з метою зменшення їх ціни та збільшення коефіцієнта корисної дії;
- впровадження концентраторів сонячної енергії;
- впровадження слідкуючих систем за Сонцем.

Вище уже було розглянуто деякі досягнення у галузі розробки прогресивних технологій виготовлення сонячних елементів, які дозволяють зменшити їх ціну та збільшити коефіцієнт корисної дії (див. рис. 1.3 і рис. 1.4).

В розвитку фотоелектричних технологій, крім розробок різних типів сонячних елементів, лідерство займають кристалічні кремнієві сонячні елементи з показником на ринку більше 85% [17]. Цей факт можна пояснити великою кількістю кремнію в природі, він не є дорогим, а також добре розвинена індустрія з виробництва напівпровідникових компонентів на основі кремнію. Все зазначене впливає на ціну кремнієвих сонячних панелей, що є відносно невисокою в порівнянні з іншими типами сонячних панелей. Передбачається, що сонячні панелі на основі кристалічного кремнію можуть стати базою для побудови системи децентралізованого електропостачання [18].

У кваліфікаційній роботі в якості практичного застосування монтаж сонячної установки виконано з наявних сонячних панелей, тому підвищення ефективності сонячної установки за допомогою розробки прогресивних технологій виготовлення сонячних елементів ми не розглядали.

Зауважимо, що основну масу сонячних установок при встановленні орієнтують на південь та під постійним кутом  $\beta$  до горизонту (рис. 1.5).

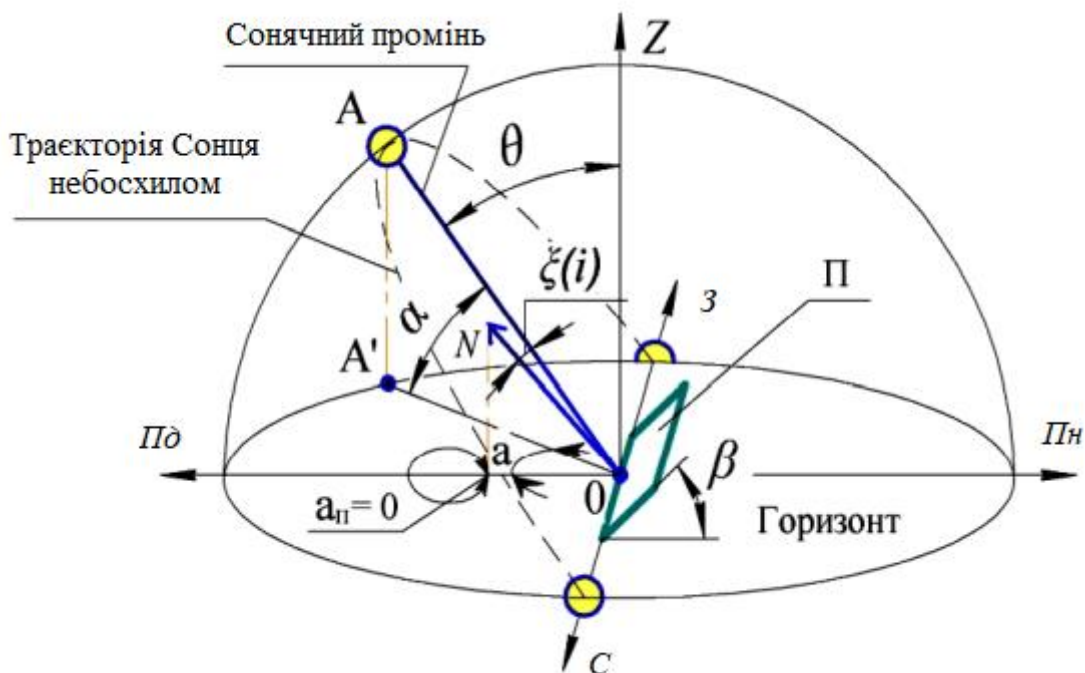


Рисунок 1.5 – Просторова орієнтація наземних сонячних установок відносно Сонця: Пд, Пн, С, З – сторони світу; А - положення Сонця на небосхилі;  $a$  - азимут Сонця;  $\theta$  – кут зеніту,  $\alpha$  – кут висоти Сонця; П – поверхня сонячної установки;  $N$  – нормаль до поверхні;  $a_n$  - азимут поверхні;  $\zeta(i)$  – кут між нормаллю та напрямом на Сонце;  $\beta$  – кут нахилу

Сонячні установок з постійною орієнтацією сонячних панелей мають широке використання, оскільки є простими в конструкції, надійними та відносно дешевими. До їх недоліків відносять низьку ефективність генерації електричної енергії, так як сонячні промені падають на поверхню сонячних панелей неперпендикулярно - нерухома орієнтація сонячних установок не враховує переміщення Сонця по небосхилу за азимутом та зенітом. Зниження сонячної енергії через неперпендикулярність падіння сонячних променів на поверхню сонячних панелей зменшує їх активну площу, збільшує втрати сонячного випромінювання через захисне покриття панелей та внутрішні втрати енергії внаслідок затінення окремих сонячних елементів.

Для того, щоб збільшити випромінювання питомого потоку сонячної енергії на сонячну установку та зменшити площу сонячних елементів  $i$ , відповідно, витрати на встановлення сонячних панелей аналогічної потужності, застосовують

концентраторів. Відомо, що концентроване випромінювання дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії перетворення сонячного випромінювання сонячними елементами [12]. На рис. 1.6 приведено приклад сонячної установки з невеликою сонячною панеллю, концентратором та слідкуючою системою.

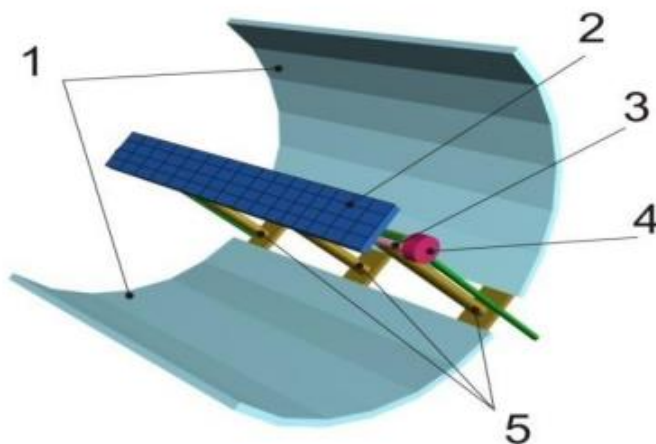


Рисунок 1.6 – Сонячна установка з концентратором для сонячної панелі із багатоперехідними сонячними елементами: 1 – система концентрації; 2 – фотоелектричний модуль; 3 – сонячна панель; 4 – вузол комутації; 5 – механічна конструкція

Протилежні площі концентруючої системи створюють 2-стороннє опромінення блоку прийому, де розміщена сонячна панель. Над блоком прийому розміщено фотоелектричний модуль, який використовується для власних потреб установки. Для електричної комутації з блоком прийому служить комутаційний вузол. До недоліків цієї установки можна віднести потребу в системі системи охолодження сонячних панелей, важку опорну конструкцію, складну слідкуючу систему, що в загальному збільшує її вартість.

Сонячні установки з оптичними концентраторами мають низьку ціну і невелику вагу оптичних концентраторів сонячного випромінювання, що дозволяє знизити масу опорної конструкції та потужність слідкуючої системи і, відповідно, її загальну вартість (рис. 1.7). До недоліків цієї установки варто віднести потребу у системі охолодження та системі слідкування за Сонцем, які вимагають постійного контролю і обслуговування.



Рисунок 1.7 – Сонячна установка з оптичними концентраторами

Для зниження загальних витрат на одиницю потужності запропоновано перспективний напрямок розвитку сонячної енергетики з сонячними панелями на базі установок з нерухомим концентратором і рухомим приймачем [19].

При використанні нерухомої конструкції концентруючої системи непотрібно застосовувати електропривод, що зменшує її ціну та підвищує надійність. Особливо ця перевага проявляється в потужних сонячних установках з концентраторами великих розмірів. Також, з метою зниження початкових фінансових вкладень в якості концентруючої поверхні або опорної конструкції доцільно використовувати частини будівельних споруд (рис. 1.8) [20].

В якості недоліків при використанні концентраторів сонячної енергії в сонячних установках можна відмітити наступне:

- потрібні спеціальні технічні засоби та заходи для відведення тепла від сонячних елементів;
- складна конструкція та експлуатація установки, велика матеріаломісткість, складність та висока вартість виготовлення таких концентраторів;
- потрібна система орієнтації за Сонцем для рухомих концентраторів;

- спостерігаються втрати сонячної енергії, які залежать від коефіцієнта відбиття концентруючої системи.

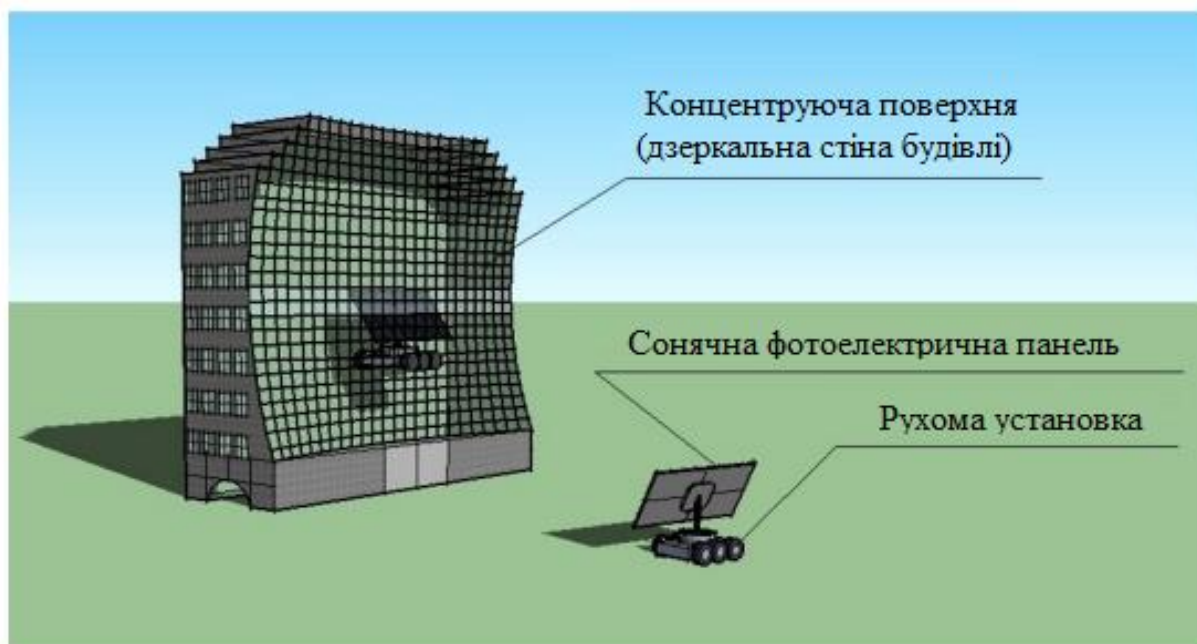


Рисунок 1.8 – Сонячна установка з нерухомим концентратором та пересувною сонячною панеллю

Всі ці вказані недоліки можуть мати такі наслідки, як збільшення маси, ціни сонячних установок, зниження надійності і ін. Також варто відмітити, що звичайні кремнієві сонячні елементи, які ми розглядали вище, хоча і є не дуже дорогими, але зазвичай не розраховані для роботи з висококонцентрованим випромінюванням. Тому на сьогоднішній день в сонячних установках з концентраторами сонячного випромінювання застосовують сонячні елементи зовсім іншого типу, які є доволі дорогими.

Приймаючи до уваги нещодавні світові фінансові та економічні криз, які показали, що визначальним фактором є початкова ціна, то застосування концентруючих систем в сонячних установках з дорогими сонячними елементами (в деяких випадках і з дорогими концентраторами) у важких економічних умовах деяких галузей промисловості може бути економічно не рентабельним та недоцільним.

Найбільший прихід сонячного випромінювання на поверхню сонячних панелей може забезпечити застосування систем стеження за Сонцем в сонячних установках, що також дозволить збільшити вихідну потужність сонячних установок та денний інтервал генерування електроенергії [21].

#### 1.4 Аналіз сонячних установок з слідкуючими системами за Сонцем

На даний час спостерігається зростання великої кількості різних сонячних установок з системами стеження за Сонцем, що є наслідком активного розвитку сонячної енергетики, і які принципово відрізняються за технологічними та технічними рішеннями. На рис. 1.9 представлено класичну класифікацію у вигляді схеми сучасних та перспективних різновидів сонячних установок [1] (рис. 1.9).

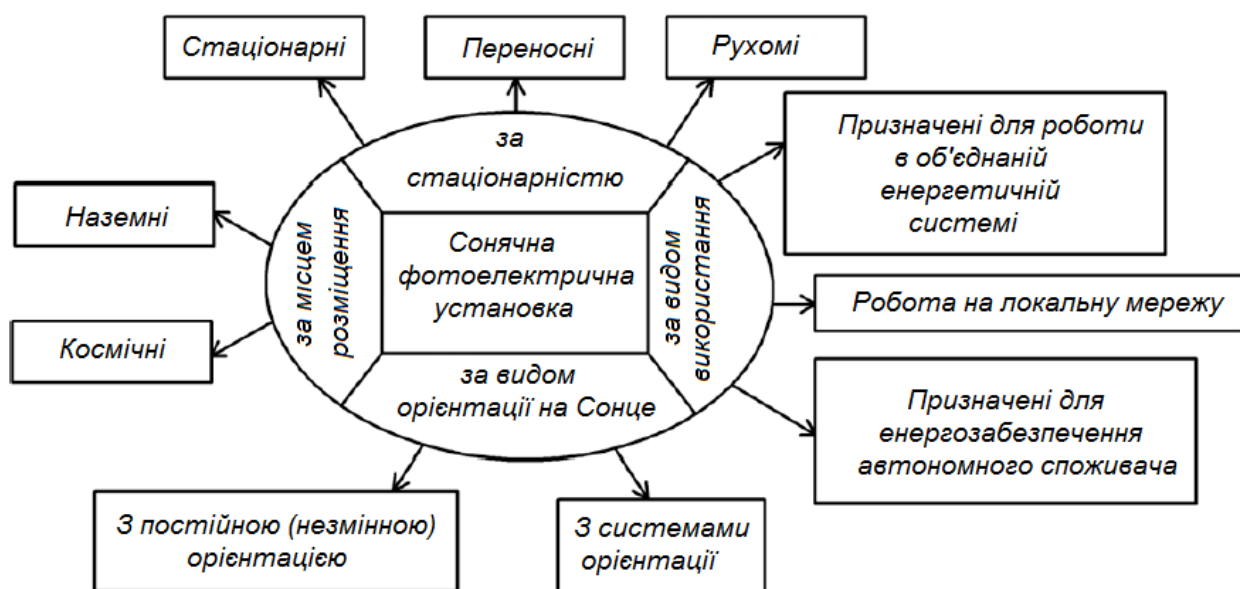


Рисунок 1.9 – Класифікація сонячних установок

У кваліфікаційній роботі ми розглянемо сонячні установки, які можуть бути використані в умовах навчального закладу та призначені для електропостачання автономного споживача: стаціонарні, з частковою орієнтацією за Сонцем. На рис.

1.10 приведено класифікацію слідкуючих систем за Сонцем з урахуванням найбільш важливих відмінних ознак.

Відповідно до методу управління виконаємо класифікацію активних слідкуючих систем: їх можна поділити на адаптивні (слідкуючі) і програмні, які непристосовані до змінних умов роботи об'єкта управління [23].

Слідкуючі системи для отримання найкращого управління можуть самі змінювати параметри або алгоритм впливу регулювання на об'єкт управління, мають давачі для реєстрації відхилення положення приймача від заданої орієнтації та технічні засоби для виконання корекції похибок. Програмні системи управління не оснащені давачами і можуть за наперед заданою програмою змінювати положення приймача, що відповідає траєкторії руху Сонця.



Рисунок 1.10 – Класифікація слідкуючих систем

Дальше розглянемо та проаналізуємо системи слідкування за Сонцем в сонячних установках з метою визначення раціонального їх застосування для умов роботи певних споживачів. У кваліфікаційній роботі ми не будемо розглядати слідкуючі системи з ручним управлінням, хоча вони є простими в кон-



структивному плані, але не володіють точністю орієнтації, тобто залежні від роботи оператора, роботу якого також потрібно оплачувати.

На рис. 1.11 зображено сонячну установку, в склад якої входить опорна плита, панелі та телескопічні штанги, які заповнені спеціальною рідиною з великим коефіцієнтом об'ємного розширення. Принцип роботи цієї сонячної установки полягає в наступному: сонячні промені попадають на телескопічну штангу, внаслідок чого штанга нагрівається і рідина, яка знаходиться всередині, розширюється та здійснює поворот панелі.

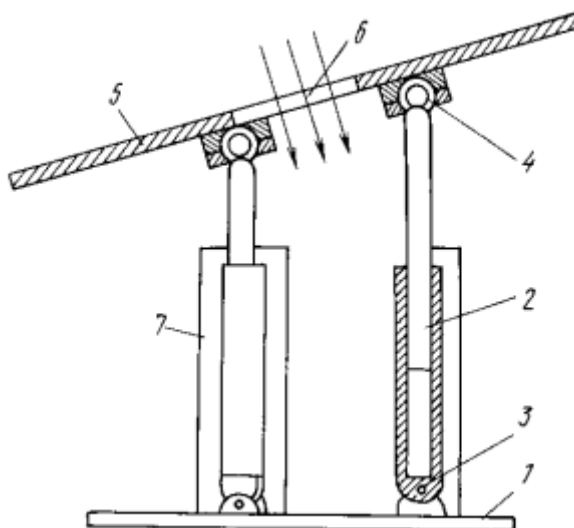


Рисунок 1.11 – Сонячна установка із слідкуючою системою:  
 1 – плита опорна; 2 – штанги телескопічні; 3 – шарнір циліндричний;  
 4 – шарніри кульові; 5 – панель; 6 – отвір; 7 – екран

На рис. 1.12 приведено зображення конструкції сонячної установки з віссю обертання, що має в своєму складі сонячну панель, подвійний механізм передачі і термічні телескопічні приводи.

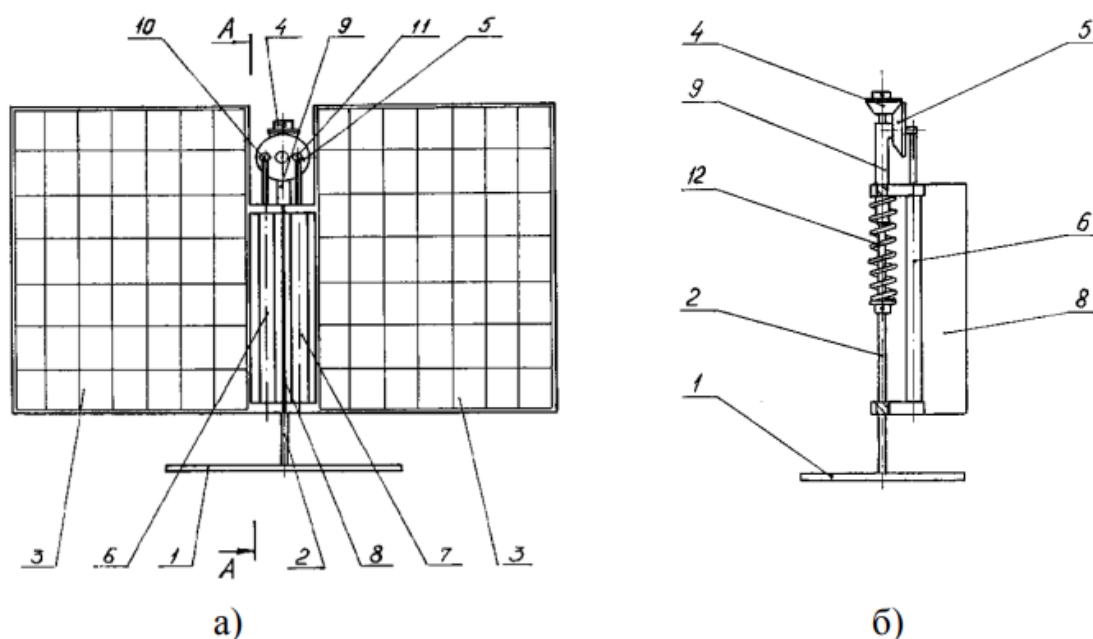


Рисунок 1.12 – Сонячна установка із слідкуючою системою:  
 а - загальний вигляд; б - фронтальний розріз; 1 – основа;  
 2 – вісь обертання; 3 – сонячна панель; 4, 5 – передаточний механізм;  
 6, 7 – термічні приводи; 8 – екран; 9 – втулка;  
 10, 11 – упорні шпильки; 12 – пружина

Ця сонячна система працює наступним чином: обертання та поздовжнє переміщення сонячної панелі здійснюється штоками термічних приводів через механізм передачі внаслідок створюваної різниці температур на світлопоглинаючій поверхні термічних приводів при попаданні на них сонячного випромінювання до повного вирівнювання температури на обох термічних приводах. Компенсація добових та сезонних коливань температури повітря здійснюється за допомогою повздовжніх переміщень сонячної панелі вздовж напрямку її осі і без повороту.

На рис. 1.13 приведено зображення конструкції автономна слідкуючої сонячної установки за переміщенням Сонця небосхилом, в якій у вигляді торсіонів застосовано термічні приводи, виготовлені з металу і мають ефект пам'яті форми та попарні деформовані крученням у різних напрямках. Здійснення автоматичної орієнтації панелі за Сонцем виконується за допомогою обертання 2-х

осей - зенітної та азимутної, а також за допомогою розгортання одних торсіонів та згортання інших внаслідок різниці температур, яка виникає при різних ступенях освітленості цих торсіонів.

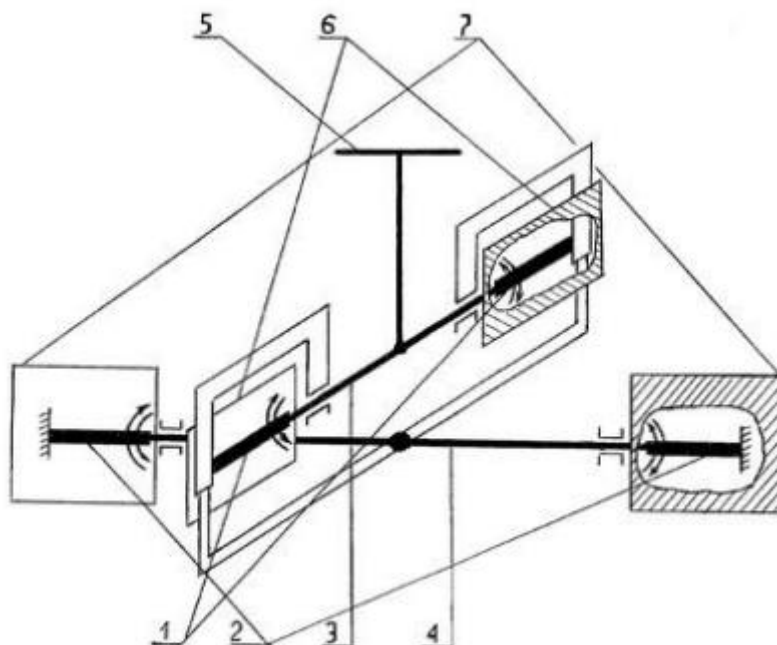


Рисунок 1.13 - Автономна слідкуюча система за Сонцем:  
1, 2 - торсіони; 3, 4 – обертаючі осі; 5 - панель сонячна;  
6, 7 – відбиваючі екрани

До слідкуючих систем цих сонячних установок можна віднести такі переваги, як простота конструкції та обслуговування, їх надійність, вони фактично не мають втрат електричної енергії. В якості недоліків цих слідкуючих систем відзначають їх низьку точність орієнтації, що проявляється у великих відхиленнях при наведенні через пориви вітру, а також через низькі температурні показники навколишнього середовища.

Враховуючи непостійність природно-кліматичних умов, що характеризуються певними перепадами річних і денних температур в більшій частині України, зокрема в карпатському регіоні, активні слідкуючі системи доцільно виконувати на основі електричних засобів автоматизації з врахуванням вибраних

умов експлуатації, оскільки вони мають меншу схильність до впливу навколишнього середовища у порівнянні з слідкуючими системи на основі терморегулювання.

На рис. 1.14 приведено конструкцію слідкуючої системи сонячної установки з режимом безперервного стеження за Сонцем.

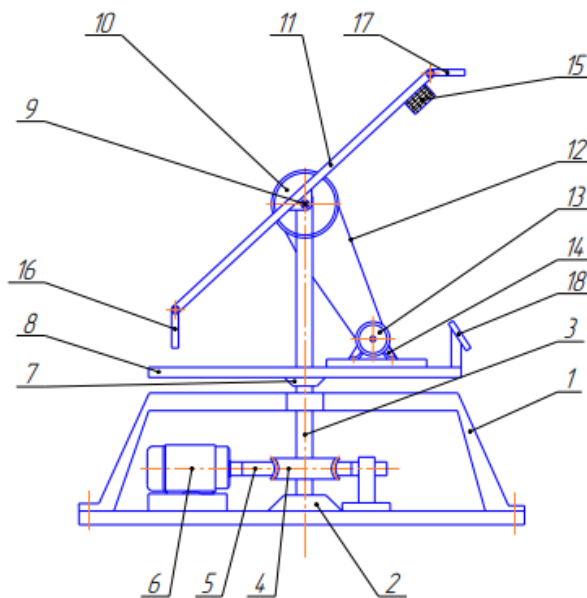


Рисунок 1.14 - Безперервна слідкуюча система за Сонцем:

1 – корпус; 2 – підшипник; 3 – вал вертикальний; 4 – зубчасте колесо; 5 – вал гвинтовий; 6, 14 – реверсивні електродвигуни; 7 – муфта; 8 – монтажна площадка; 9 – вал горизонтальний; 10 – шків; 11 – сонячна панель; 12 – передача ремінна; 13 – колесо; 15 – лівий та правий фотоелементи; 16, 17 - нижній та верхній фотоелементи; 18 – задній фотоелемент

Для забезпечення азимутного та зенітного повороту сонячних панелей така сонячна електростанція оснащена вертикальним та горизонтальним валами. До складу системи автоматичної орієнтації електричної станції входить зенітний та азимутний слідкуючі електроприводи з командними сонячними елементами на слабострумівих виконавчих реле та електроприводи реверсивних двигунів. Для повернення сонячної установки після заходу Сонця у початкове положення на валу азимутного повороту встановлено додатковий командний сонячний елемент, який подає сигнал на електропривод вертикального валу.

Серед розповсюджених промислових слідкуючих систем стеження варто звернути увагу на продукцію компанії *Poule Solar Co. Ltd (Traxle Solar s.r.o.)*, яка відома на європейських ринках і розробила та впроваджує слідкуючі системи за Сонцем *Traxle* - їх ще називають трекерами (рис. 1.15).



Рисунок 1.15 – Сонячна установка *Traxle* зі слідкуючою системою

У таких країнах як Чехія, Німеччина, Англія, Швейцарія, Іспанія і ін. підтверджено надійність цих систем на основі багаторічного досвіду їх використання. Труба з нахилом до горизонту є базовою частиною *Traxle*, до неї прикріплені рейки, на яких розміщено сонячні панелі. Через гвинтову механічну коробку передач електричний двигун постійного струму, який вмонтовано у трубу, повертає всю конструкцію. Механічна коробка передач є самогальмівною із захистом від сильного вітру, а живлення на електричний двигун поступає від 2-стороннього сонячного модуля, змонтованого в нижній частині труби, який одночасно виступає також датчиком подачі сигналу для повороту слідкуючої системи [23].

На рис. 1.16 показано конструкцію поворотної системи фірми *Селтек*, до складу якої входить зовнішня поворотна система та контролер (внутрішнє управління), які забезпечують умови автоматичного слідкування за Сонцем.



Рисунок 1.16 – Поворотна система фірми Селтек:  
а) поворотна система; б) система управління

Орієнтація цієї системи за Сонцем по азимуту та куту піднесення здійснюється за допомогою 2-х електроприводів, на які подає сигнал система управління. Реалізація закладеного програмного алгоритму на основі траєкторії руху Сонця дозволяє за допомогою мікроконтролера здійснювати основне управління поворотною системою. Закладена програма слідування за Сонцем враховує пори року та може працювати на будь-якій географічній території [4].

Отже, активні сліdkуючі системи, які обладнані електричними засобами автоматизації сліdkування мають ряд переваг у порівнянні з системами на основі терморегулювання, зокрема, висока точність наведення, значно меншу залежність від впливу навколишнього середовища. До недоліків слід віднести відносно складу конструкцію установки, що є причиною зниження надійності та високої вартості сонячної установки в цілому.

Таким чином, в тих умовах виробництв, які мають недостатню кількість робочого персоналу з низькою кваліфікацією праці, для підвищення ефективності сонячних установок доцільно впроваджувати електрифіковані активні сліdkуючі системи за Сонцем, оскільки вони є достатньо надійними, володіють простою конструкцією та не вимагають частого обслуговування.

Ще однією умовою щодо доцільності застосування слідкуючих систем у сонячних установках для орієнтації сонячних панелей в залежності від різноманітних факторів є проведення відповідних розрахунків та досліджень, які зазвичай виконуються за допомогою відомих математичних апаратів та програм віртуального моделювання.

### **1.5 Висновки до розділу**

1. Враховуючи уже сформовані, а також наростаючі енергетичні та екологічні проблеми у багатьох секторах економіки, маємо очевидні передумови розвитку сонячної фотоенергетики.

2. Літературний аналіз доступних джерел показав, що основні способи підвищення ефективності сонячних установок полягають у:

- розробці прогресивних технологій конструювання сонячних елементів, які дозволять зменшити їх ціну та збільшити коефіцієнт корисної дії;
- використанні ефективних концентраторів сонячного випромінювання;
- застосуванні слідкуючих систем за Сонцем.

3. На даний час в умовах багатьох виробництва одним з найоптимальніших методів підвищення ефективності сонячних установок є впровадження слідкуючих систем за Сонцем.

4. Застосовувати слідкуючі системи у сонячних установках доцільно після проведення необхідних розрахунків та математичного моделювання на віртуальній моделі.

## 2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Методика розрахунку автономних сонячних установок

На сьогоднішній день альтернативою дизельним та бензиновим генераторам, які характеризуються високою ціною обслуговування та нетривалим терміном служби обладнання, є впровадження сонячних електростанцій в якості автономного джерела енергії. Коли внаслідок певних причин під'єднання до стандартної електромережі постачання неможливе, то сонячна електростанція може в деякій мірі повністю або частково вирішити цю проблему. Конструкція автономної сонячної електроустановки є доволі простою, в якій сонячні панелі за допомогою контролера під'єднуються до акумуляторних батарей, а накопичена в них електрична енергія використовується споживачем. Щоб споживач мав напругу змінного струму із цієї енергії необхідно в склад установки включити інвертор [13]. Головним недоліком такої автономної сонячної установки є потреба в акумуляторних батареях, які є найдорожчим обладнанням цієї системи з найменшим терміном експлуатації у порівнянні з іншим обладнанням [24].

Альтернативою автономній сонячній електростанції може бути мережева сонячна електростанція, суть роботи полягає в паралельній роботі сонячних панелей і загальної електромережі та економії споживаної електроенергії із цієї мережі електропостачання. В цьому випадку термін експлуатації обладнання буде суттєво перевищувати термін окупності при значно менших початкових інвестиціях. Щоб забезпечити найефективнішу роботу такої сонячної установки потрібно, щоб виробіток електроенергії узгоджувався із споживанням.

Поряд з перевагами мережева сонячна установка має і недоліки:

- під'єднані до мережі сонячні системи вимагають для своєї роботи наявності напруги в мережі, в протилежному випадку мережевий інвертор не буде працювати;
- коли сонячними панелями генерується енергії більше, ніж споживається, то в мережу направляються надлишки енергії, що створює конфліктну ситуацію



оскільки основна маса лічильників електроенергії є односпрямованими. В цьому випадку потрібно встановлювати спеціальні мережеві сонячні інвертори для зниження потужності при надлишку сонячної енергії, або спеціальний контролер за надлишками сонячної енергії [20].

Також можна використовувати і гібридні сонячні установки, яким притаманні функції мережевої та автономної установок. Відмінність схема гібридної установки від схеми автономної полягає в тому, що тут замість звичайного інвертора батареї використовується гібридний перетворювач з мережевим входом і може додавати сонячну електроенергію до мережевої. Зі споживчої точки зору Це є вигідним моментом для споживача, оскільки можна забезпечити резерв енергії рахунок акумуляторних батарей та зекономити кошти за рахунок генерації енергії сонячними панелями.

Отже, виконаний аналіз вказує на доцільність впровадження в цій кваліфікаційній роботі для бюджетних установ мережевих сонячних установок, оскільки вони не вимагають встановлення дорогих акумуляторних батарей і дешевшими при монтажі та обслуговуванні.

При розрахунку енергетичних установок на базі відновлювальних джерел енергії будемо використовувати методичне забезпечення на базі інформаційних та розрахункових параметрів. Для сонячних установок інформаційними параметрами є дані про величину сонячного випромінювання, які можна отримати з спеціалізованих доступних джерел або баз даних про кількість сонячного випромінювання на основі багаторічних спостережень за кліматичними та сонячними енергетичними характеристиками в багатьох світових географічних локаціях [26].

Розрахункові параметри представляють собою розрахунок параметрів автономної сонячної установки та відповідний вибір комплектуючого обладнання: сонячних панелей, контролера заряду-розряду, мережевого інвертора, акумуляторних батарей та ін.

У цьому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто послідовність та формули розрахунку таких сонячних установок, що відповідають випроміню-

ванню, яке попадає на сонячні панелі. Для отримання найбільшої кількості сонячної енергії необхідно дотримуватись оптимального розташування панелей відносно Сонця. В наступному розділі кваліфікаційної роботи буде розглянуто питання побудови системи управління, яка дозволяє реалізувати орієнтацію сонячних панелей.

На рис. 2.1 приведено структурну схему автономного електропостачання на базі сонячної установки.

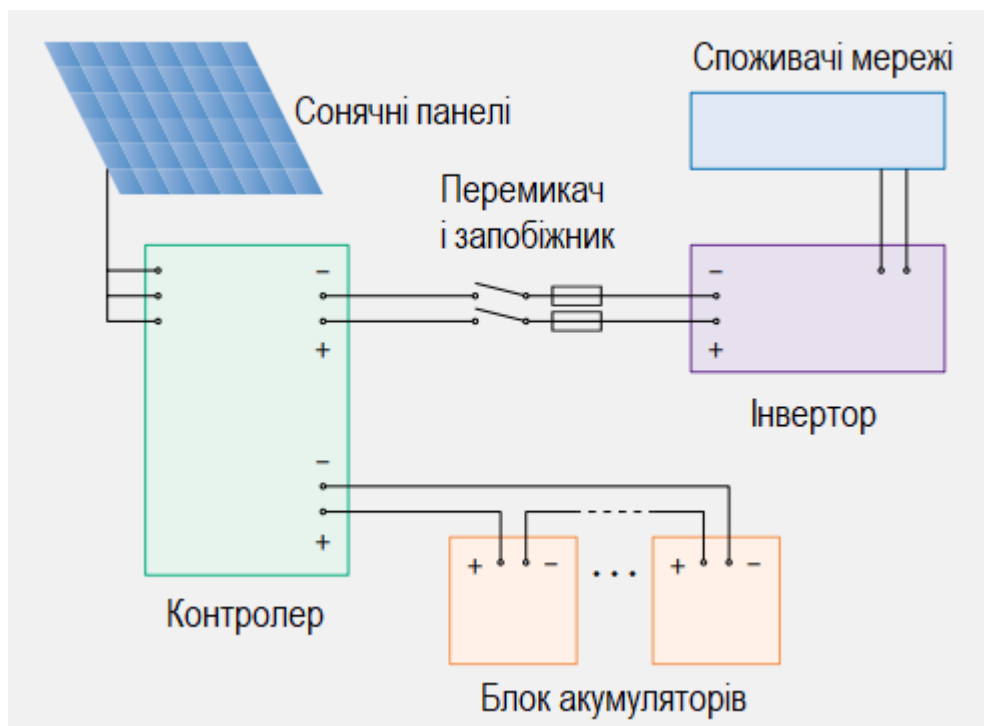


Рисунок 2.1 – Структурна схема автономної сонячної системи з акумуляторним резервом

Дальше виконаємо розрахунок технічних параметрів сонячної енергетичної установки на базі сонячних панелей.

## 2.2 Розрахунок та вибір інвертора

Обов'язковим компонентом сонячної електричної установки є інвертор, так як сонячні панелі генерують тільки напругу постійного струму, а основне навантаження зазвичай живиться напругою змінного струму [27].

В цьому випадку вихідна потужність та вхідна напруга виступають основними параметрами при виборі інвертора. Оскільки пікова потужність навантаження, як правило, компенсується здатністю інвертора короткочасно віддавати потужність, яка більша за паспортне значення, то окремо розраховувати інвертор на цей параметр не потрібно. Паспортне значення слід вибирати з невеликим запасом (до 10%), так як лишня потужність інвертора в режимі холостого ходу викликає збільшення втрат енергії при живленні приладів навантаження.

Інвертор є складовою частиною сонячної електростанції станції і отримує живлення від сонячних панелей або від акумуляторів. Тому для визначення параметрів цих пристроїв необхідно знати величину споживаної інвертором потужності, яка перевищує потрібну вихідну потужність на значення його власних внутрішніх втрат, які становлять 10% від паспортної вихідної потужності обладнання для сучасних інверторів.

Тобто, вхідну потужність інвертора можна визначити за формулою:

$$P_{inv} = P_{cn} \cdot k, \quad (2.1)$$

де  $P_{cn}$  – значення номінальної потужності навантаження, становить біля 30% потужності для всіх ввімкнених приладів, Вт;

$k$  – значення коефіцієнта запасу за потужністю та власними втратами в інверторі;  $k = 1,2$ .

Коли вибирають вхідну напругу, то враховують, що зі збільшенням потужності інвертора зростають також вхідні струми і, відповідно, втрати на з'єднаннях комутаційних проводів. Для зниження цих втрат виконують вибір з стандартного ряду 12, 24, 36, 48 вищої вхідної напруги. Також необхідно брати до уваги певні параметри, які залежать від типу навантаження та умов експлуатації установки:

- форми сигналу на виході;
- способу перетворення енергії;
- наявності можливості паралельного підключення;

- присутності механізму примусового охолодження;
- невеликого споживання на холостому ходу та наявності режиму очікування;
- захисту від високої і низької напруги акумуляторних батарей, вихідного короткого замикання та перевантаження, перегрівання;
- діапазону робочих температур.

### 2.3 Розрахунок кількості акумуляторних батарей та вибір їх типу

Необхідним складовим елементом сонячної електростанції є акумуляторні батареї, які забезпечують безперебійне живлення споживачів при нестачі енергії від сонячних панелей в вечірній час доби або за похмурої погоди, а також є джерелом накопичення електричної енергії з метою її віддачі споживачеві при необхідності. Такий показник, як час резервування, дозволяє визначити максимальний час автономної роботи сонячної електроустановки та характеризує сумарну ємність акумуляторних батарей. Відповідно до погодних умов, що залежать місця розміщення сонячної установки і широти, визначають ресурс сонячної енергії. Тому час резервування визначається кількістю послідовних днів без сонячної погоди, значення якого можна вибирати з табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Кількість днів без сонця внаслідок погодних умов

Широта місцевості	Місяці року		
	літні	весняні, осінні	зимові
30	3-5	4-5	5-6
40	3-5	5-6	8-10
50	3-5	7-8	10-14
60	4-6	8-10	14-20
70	4-6	10-12	20-30

Для забезпечення необхідного часу резервування визначаємо необхідну загальну ємність акумуляторних батарей за наступною формулою:

$$Q_{AB} = \frac{P_{инв} \cdot N_{бс} \cdot \alpha}{U_{инв} \cdot \gamma}, \quad (2.2)$$

де  $Q_{БА}$  – загальна ємність акумуляторних батарей, А·год;

$\alpha$  – температурний коефіцієнт ємності акумуляторних батарей;

$\gamma$  – коефіцієнт розряду.

Коефіцієнти  $\alpha$  і  $\gamma$  використовують при виборі типу акумуляторної батареї, а також служать для визначення розрахункової ємності акумуляторної батареї і швидкості зменшення цього показника в ході експлуатації (кількість циклів заряду-розряду) та загального терміну служби батарей [28]. Термін служби батарей дуже часто використовується для герметичних акумуляторних батарей, які є в складі автономних система електропостачання.

На рис. 2.2 приведено графіки залежності швидкості спадання залишкової ємності акумуляторної батареї під час експлуатації при різних величинах глибини розряду та терміну їх служби від впливу глибини розряду.

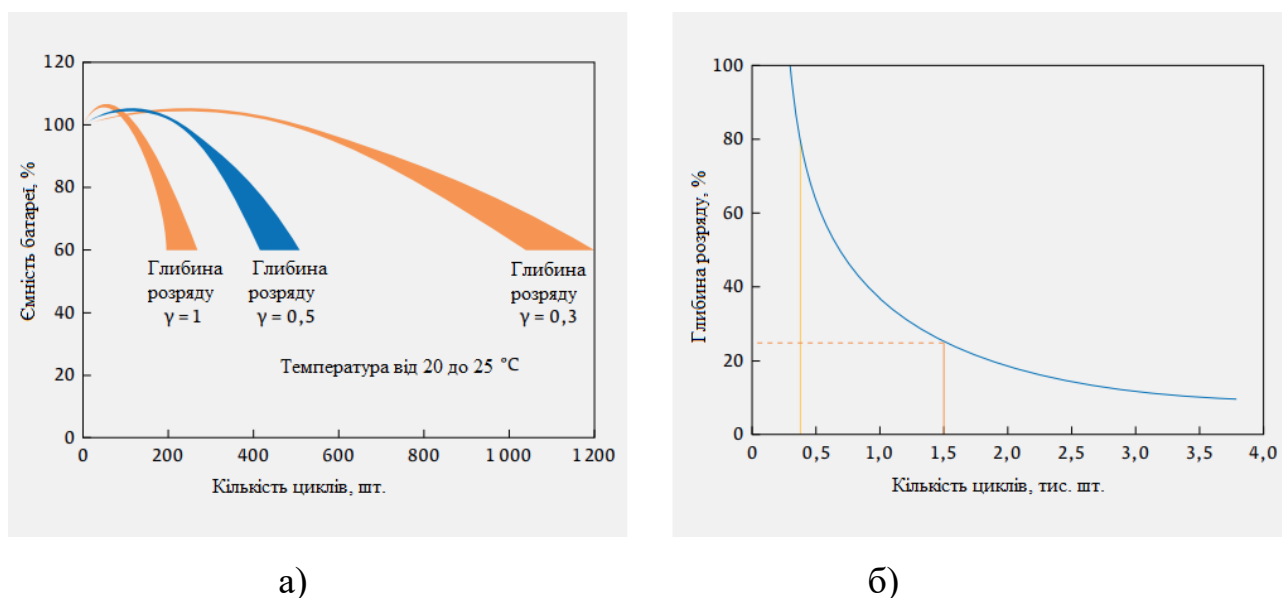


Рисунок 2.2 – Залежність глибини розряду від: а) швидкості падіння залишкової ємності батареї; б) напрацювання батареї

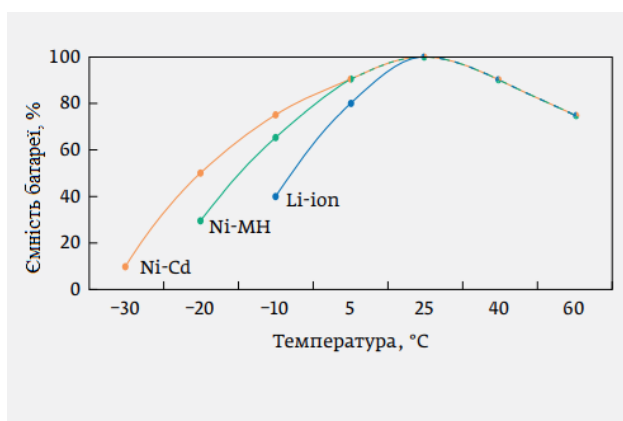
Аналіз наведених графіків показує, що з метою забезпечення необхідного терміну роботи акумуляторних батарей (на рівні 1500 циклів) глибина розряду не повинна перевищувати 80%. Але також варто відмітити, що зменшення глибини розряду викликає зменшення доступної для споживання енергії, а це при встановленій величині потужності споживання вимагає більшої кількості акумуляторних батарей у складі сонячної установки.

Для забезпечення необхідної довговічності акумуляторних батарей та їх оптимальною кількістю у складі сонячної установки в реальних умовах потрібно шукати компромісне рішення, яке можна забезпечити різними технологіями від виробників акумуляторних батарей для сонячних установок. Наприклад, при використанні свинцево-кислотних акумуляторів рекомендується значення коефіцієнта  $\gamma = 0,2-0,5$ , а при використанні літій-іонних та нікель-кадмієвих акумуляторів, які є стійкіші до глибокого розряду, при розрахунках беруть більші значення коефіцієнта розряду (табл. 2.2). Тому такі типи акумуляторних батарей в більшості випадків використовуються в автономних системах електрпостачання, хоча вони не можуть нормально працювати при мінусових температурах.

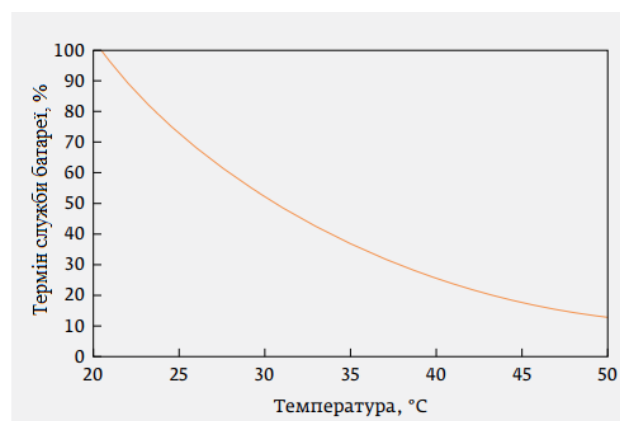
Таблиця 2.2 – Глибина розряду для різних типів акумуляторних батарей

Тип батареї	Розряд допустимий, %	Розряд рекомендований, %
VRLA	70	40
AGM	80	50
GEL	90	50
OPZV	90	60
OPZS	90	60
Li-Ion	100	80
Ni-Cd	100	70

Можна сказати, що всі основні характеристики акумуляторних батарей є практично залежними від температури оточуючого середовища, зокрема для експлуатації оптимальною вважається температура в межах від 20 до 25 °С. При зменшенні температури починає різко спадати напруга акумуляторної батареї та зменшуватися її ємність, що приводить викликає некоректні умови роботи навантаження і скорочення часу роботи сонячної установки в безсонячному режимі (рис. 2.3, а). Внаслідок роботи при підвищених температурах можна також отримати негативні наслідки, тобто якщо ємність акумуляторної батареї відновлюється при оптимальних параметрах, то їх робота при високих температурних режимах може викликати критичне зменшення терміну їх служби (рис. 2.3, б).



а)



б)

Рисунок 2.3 – Залежність температури оточуючого середовища від:  
а) ємності батарей; б) терміну служби батарей

У формулі (2.2) введено значення температурного коефіцієнта ємності  $\alpha$ , який є множником для збільшення необхідної загальної ємності акумуляторної батареї з метою врахування її падіння відносно номінального значення при зміні температури оточуючого середовища. Наприклад, якщо в розробленій сонячній установці заплановано встановити нікель кадмієві, нікель-металогідридні або літій-іонні акумуляторні батареї і вони будуть працювати при оптимальних температурах, то можна використовувати значення коефіцієнта, які приведені в

табл. 2.3. Подібна інформація надається також виробником акумуляторних батарей в технічній документації.

В автономних сонячних установках в більшості випадків використовують акумуляторні батареї одного типу та ємності [28]. Щоб досягнути потрібної напруги та загальної ємності батареї акумуляторів їх об'єднують у послідовно-паралельну схему, число окремих акумуляторних батарей у якій рівне:

$$N_{БА} = N_{пар} \cdot N_{посл}, \quad (2.3)$$

де  $N_{пар}$ ,  $N_{посл}$  – число акумуляторних батарей, які з'єднані паралельно та послідовно.

Таблиця 2.3 – Значення температурного коефіцієнту

Температура, °C	Коефіцієнт $\alpha$
27,0	1,0
21,5	1,05
15,5	1,1
10,5	1,2
4,5	1,3
-1,5	1,4
-6,5	1,5

Враховуючи ту обставину, що сумарна ємність батареї акумуляторів  $q_{БА}$  рівна сумі ємностей окремих акумуляторних батарей, а напруга на кожній паралельній групі рівна вхідній напрузі інвертора, то формулу (2.3) можна представити наступним чином:

$$N_{БА} = N_{пар} \cdot N_{посл} = \frac{q_{БА}}{q_{ном}} \cdot \frac{U_{інв}}{U_{ном}}, \quad (2.4)$$

де  $q_{ном}$  - ємність однієї акумуляторної батареї, А·год;

$U_{ном}$  - напруга на акумуляторі, В.



## 2.4 Розрахунок кількості сонячних панелей та вибір їх типу

Розміри сучасних сонячних панелей орієнтовно мають площу в межах від 1,5 до 2,0 м<sup>2</sup>, а їхня потужність знаходиться в інтервалі від 200 до 280 Вт. Далі сонячні панелі можна з'єднувати паралельно, але в одній збірці потрібно використовувати тільки панелі одного типу [29].

Сучасний ринок насичений великою кількістю різноманітних типів сонячних панелей, при виборі яких приймають до уваги такі визначаючі параметри як їх площу, вихідну номінальну напругу, а також тип фотоелементів. Електроенергію, яка генерується фотоелектричними перетворювачами за рік, можна визначити за формулою:

$$W_{\phi n} = F_{\phi n} \cdot \eta_n \cdot t \cdot \sum_{i=1}^k N_{i\text{CB}}, \quad (2.5)$$

де  $F_{\phi n}$  - площа фотопанелей, м<sup>2</sup>;

$\eta_n$  - коефіцієнт корисної дії панелі;

$N_{i\text{CB}}$  - інтенсивність сонячного випромінювання в  $i$ -ий період, Вт/м<sup>2</sup>;

$t_i$  - тривалість  $i$ -го періоду, год;

$k$  - число періодів.

Найпростішим варіантом отримання інформації щодо інтенсивності сонячного випромінювання для території розміщення сонячної установки є бази кліматичних даних [30]. При виконанні розрахунку сонячних панелей вихідними даними навантаження є номінальна потужність споживача та споживана від установки всіма пристроями енергія за добу [31].

Щоб покрити потрібне навантаження, необхідне виконання такої умови:

$$W_{\phi n} = W_{\phi n} \cdot k_{з-р} \cdot 365, \quad (2.6)$$

де  $k_{з-р}$  - коефіцієнт втрат на зарядку-розрядку акумуляторних батарей, для систем автономного електропостачання  $k_{з-р} = 1,2$ .

Використовуючи формули (2.5) і (2.6) можна отримати вираз для визначення загальної площі сонячних елементів сонячної установки:

$$F_{\phi n} = \frac{W_{\phi n} \cdot k_{з-р} \cdot 365}{\eta_n \cdot \sum_{i=1}^k N_{i\text{ CB}}}, \quad (2.7)$$

у якому невідомий тільки коефіцієнт корисної дії панелі, визначити який можна за матеріалом робочого фотоелектричного шару сонячної панелі.

При визначенні вигляду сонячного перетворювача для проектованої сонячної установки крім матеріалу фоточутливого шару до уваги необхідно прийняти багато факторів. Наприклад, у великих панелях ефективніше використовується загальна площа та менше зовнішніх з'єднань, відповідно, маємо більшу надійність. Також варто врахувати, що панелі на напругу 24 В мають кращі експлуатаційні характеристики за панелі на напругу 12 В тієї ж потужності, які вибирають тільки для систем з робочою напругою інвертора 12 В. Також не всі конкретні моделі сонячних елементів задовольняють ряд вимог щодо систем автономного електропостачання:

- висока надійність за час експлуатації;
- витрати на обладнання відносно терміну окупності;
- зручність обслуговування.

Також для підвищення ефективності стандартних сонячних електроустановок можна використовувати концентратори сонячного випромінювання, принцип роботи яких полягає в збиранні сонячного випромінювання з великої площі та його концентрацію на малогабаритні сонячні елементи [33]. При використанні таких концентраторів для забезпечення необхідної потужності споживання площу сонячних панелей визначають за графіком, який приведено на рис. 2.4.

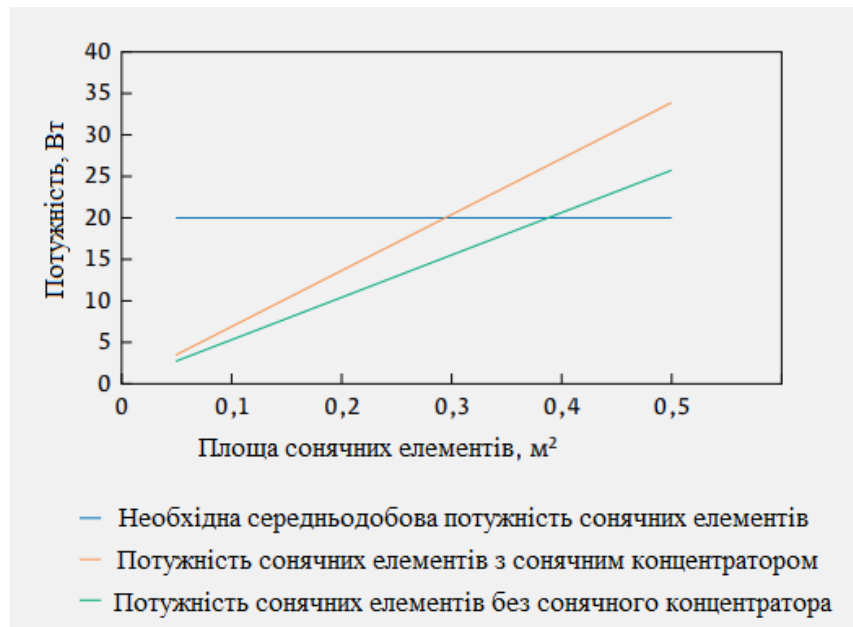


Рисунок 2.4 - Залежність потужності сонячних елементів від площі сонячних панелей

Дальше, після вибору типу панелі, розраховують кількість сонячних елементів за формулою:

$$N_n = \frac{F_{\phi n}}{F_n}, \quad (2.8)$$

де  $F_n$  – площа однієї панелі, м<sup>2</sup>.

## 2.5 Розрахунок та вибір контролера

Під час заряджання/розряджання акумуляторної батареї потрібно підтримувати задані величини струму і напруги з метою запобігання передчасного їх виходу з робочого стану. Це завдання покладено на контролер заряду, який також повинен підтримувати оптимальний рівень заряду акумуляторної батареї при різних режимах роботи сонячних панелей:

- компенсує саморозряд при максимальній ємності акумуляторної батареї;
- відключає навантаження при розряджанні до критичної величини.

Для систем автономного електропостачання на сьогоднішній день найбільш розповсюдженими та практичними у використанні є МРРТ-контролери, які можуть відстежувати точку максимальної потужності, а це дозволяє при різних режимах заряджання витратити всю наявну потужність для підтримки максимальної напруги заряджання. Внаслідок цього можна добитися збільшення ефективності використання сонячної енергії, яка перетворюється на електричну за допомогою сонячних панелей, до 30% у порівнянні з установками, обладнаними контролерами інших типів [33]. Вибір контролера здійснюють за такими параметрами як напруга на вході та потужність.

Зазвичай максимальна вхідна напруга контролера є вищою на 20% за напругу холостого ходу сонячних панелей, так як практично дуже часто спостерігається перевищення цього параметра із-за нестабільності процесів на Сонці, або некоректними значеннями паспортних даних сонячної панелі.

Для того, щоб підвищити надійність контролера, йому надають певний запас потужності в порівнянні з генерованою сонячними елементами загальною потужністю і яку визначають за наступною формулою:

$$P_{\Sigma} = I_k \cdot U_{cб}, \quad (2.3)$$

де  $I_k$  – величина вихідного струму контролера, А;

$U_{cб}$  – величина вихідної напруги сонячного елемента, В.

Крім того, контролер заряду повинен мати такі додаткові захисні функції:

- захист від неправильної полярності;
- захист від струму короткого замикання;
- захист від перевантаження;
- захист від перегрівання та атмосферних розрядів.

Після проведення необхідних розрахунків та вибору основного обладнання, було розроблено варіант схеми сонячної установки для електропостачання дослідної лабораторії (рис. 2.5).

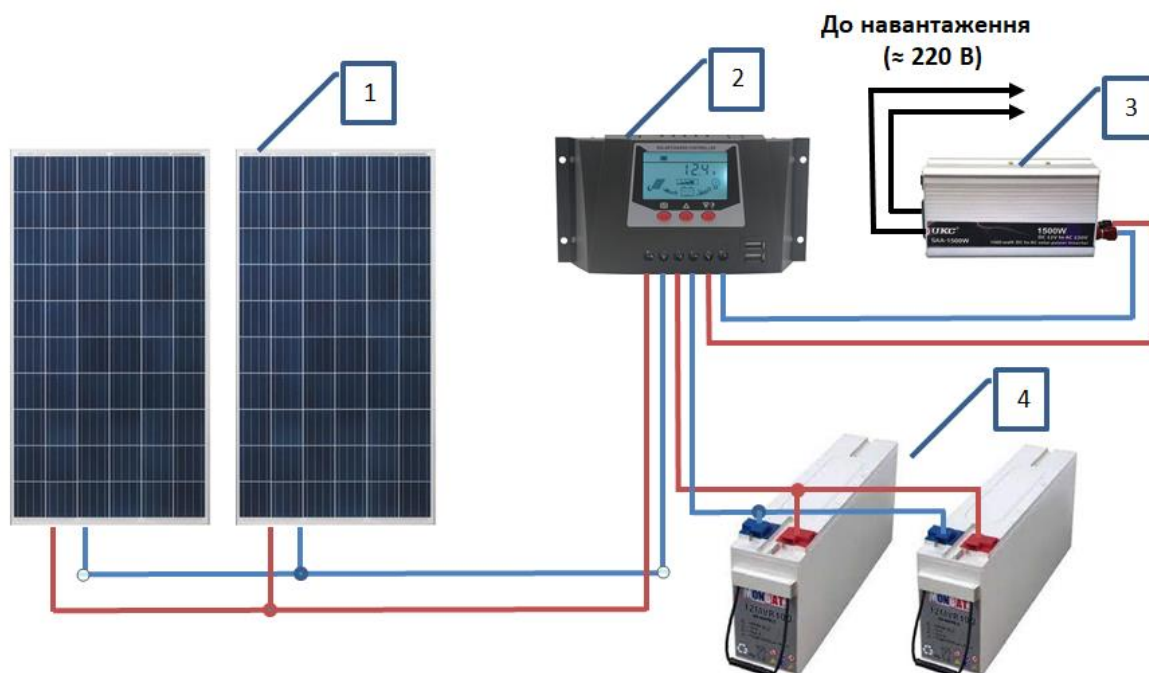


Рисунок 2.5 - Схема сонячної установки для дослідної лабораторії: 1 – сонячна панель *JKM280PP-60-V* (36 В, 280 Вт, 2 шт.); 2 – контролер заряду *WP8048 PWM* (80А, 12В/24В/48В); 3 – інвертор *UKC SAA-1500W* (DC 12V to AC 230V); 4 – акумуляторна батарея *MONBAT 12MRV100* (12В, 100 А·год, 2 шт.)

Дальше необхідно виконати розрахунок допустимої площі поперечного перерізу проводів, вибрати марку проводу та комутаційні елементи.

## 2.6 Висновки до розділу

1. Розглянуто методику розрахунку автономних сонячних установок, згідно якої для отримання найбільшої кількості сонячної енергії необхідно дотримуватись оптимального розташування сонячних панелей відносно Сонця.

2. Виконано розрахунок та вибір інвертора, основними параметрами якого є вихідна потужність та вхідна напруга.

3. Проведено розрахунок кількості акумуляторних батарей та вибір їх типу, зокрема для систем автономного електропостачання доцільно використовувати літій-іонні та нікель-кадмієві акумуляторів, які є стійкішим до глибокого розряду.

4. Виконано розрахунок параметрів сонячних панелей та вибору їх типу, який показав, що панелі на напругу 24 В мають кращі експлуатаційні характеристики за панелі на напругу 12 В тієї ж потужності.

5. Проведено розрахунок вибір контролера, виконано попередню компоновку схеми сонячної установки для електропостачання дослідної лабораторії.

6. Розглянуто в цьому розділі методику розробки сонячних енергетичних установок на базі сонячних елементів можна рекомендувати в якості інструмента для проведення дослідження та моделювання таких установок різної конфігурації з оцінкою їх ефективності та вибору відповідного варіанту практичної реалізації.

## 3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Шляхи підвищення ефективності автономних сонячних установок

Можливість використання сучасних сонячних панелей і акумуляторних батарей з покращеними технічними і економічними показниками є перспективним напрямком впровадження у практичну діяльність високоефективних автономних сонячних енергетичних установок. Але нераціонально використовуючи можливості досконалих сучасних джерел енергії, енергетична установка може показувати незадовільні енергетичні характеристики. Варто зазначити, що на даний час основну масу сонячних панелей автономних установок монтують на дахах будинків і реалізація таких систем є технічно складною та економічно недоцільною, оскільки в них відсутні системи безперервного автоматичного слідування сонячних панелей за Сонцем та їх примусового охолодження. Тому, з метою підвищення їх енергетичної ефективності при розробці та впровадженні високоефективних автономних сонячних енергетичних установок потрібно зробити основний акцент на використанні сонячних панелей з високим коефіцієнтом корисної дії і акумуляторних батарей з високими технічними характеристиками, а також на системному проектуванні електроенергетичних установок на базі сонячних систем [34].

Виконаний аналітичний аналіз в першому розділі кваліфікаційної роботи показав, що основними методами підвищення ефективності сонячних енергетичних установок є використання способу зняття потужності в оптимальній робочій точці вольт-амперної характеристики сонячної панелі під час терміну її експлуатації, тобто застосування режиму регулювання потужності сонячних панелей, а також застосування режиму безперервного автоматичного слідування сонячних панелей за рухом Сонцем по небосхилу [4,15, 21]. Якщо виконати одночасно реалізацію всіх перерахованих способів регулювання, то це дозволить підвищити енергетичну ефективність сонячних енергетичних установок більше, ніж на 30%. На величину підвищення енергетичної ефективності впливає широта

розташування, на якій розміщено сонячну установку, а також підхід та режим до умов її експлуатації.

### 3.2 Розробка конструкції автономної сонячної установки

На кафедрі електричної інженерії Тернопільського національного технічного університету розпочато розробку автономної сонячної енергетичної установки з паралельною реалізацією системи регулювання потужності сонячних панелей та їх автоматичного слідкування за Сонцем з установленою вихідною потужністю 1500 Вт.

На рис. 3.1 представлено попередній проект запропонованої 2-координатної системи наведення сонячних панелей на Сонце.



Рисунок 3.1 - Проект 2-координатної системи наведення сонячної панелі

Конструкція складається з рами, на якій розміщено 4 сонячні панелі модулями Photovoltaic JKM280PP-60-V; рухомий і нерухомий каркаси, 2 редуктори, 2 крокові двигуни, 2 датчики положення за Сонцем, 4 кінцеві вимикачі. В основі нерухомого каркасу є сталева зварна рама з 4-х кутників і профільних труб з 4-а кутковими і однією центральною опорою, в якій вмонтовано вал, обертання якого здійснюється за допомогою крокового двигуна через циліндричну зубчасту



передачу та черв'ячний редуктор. До рухомого каркасу конструкції входить металева зварна рама з закріпленою ведучою шестернею, яка контактує з центральним валом, розміщеного нижче опорного вузла, через шпоночне з'єднання для приведення обертання установки навколо вертикальної осі. Крім того, каркас має 2 дуги з встановленою віссю обертання рами, яка через муфту та редуктор з'єднується з кроковим двигуном для забезпечення повороту рами.

Черв'ячні редуктори виступають в якості силових механізмів для виконання повороту сонячної установки з заданими передатними відношеннями, що дозволяє використовувати крокові двигуни з заданим номінальним крутним моментом навантаження. Черв'ячні редуктори блокують самовільну зміну положення сонячної установки під дією сильного вітру.

Кінцеві вимикачі на рамі нерухомого каркаса сонячної установки та програмне забезпечення мікроконтролера наведення на Сонце забезпечують обмеження граничних кутів повороту автономної сонячної установки.

### 3.3 Розробка функціональної схеми сонячної установки

На рис. 3.2 приведено розроблену функціональну схему автономної сонячної енергетичної установки.

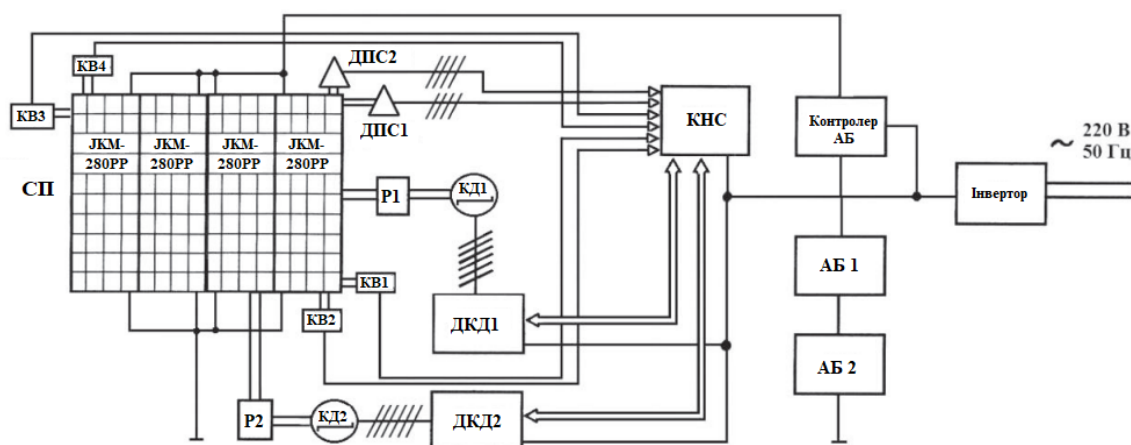


Рисунок 3.2 – Функціональна схема сонячної автономної установки

На схемі є наступні позначення: СП – сонячні панелі; Контролер АБ - контролер заряду-розряду акумуляторних батарей; АБ1, АБ2 – акумуляторні батареї; КД1, КД2 - крокові двигуни; Р1, Р2 – редуктори; ДКД1, ДКД2 – драйвери керування кроковими двигунами; ДПС1, ДПС2 – давачі положення Сонця; КНС - контролер наведення на Сонце; КВ1-КВ4 - кінцеві вимикачі.

В розробленій автономній сонячній установці використовується: інвертор типу UKC SAA-1500W з синусоїдальним виходом та номінальною вихідною потужністю 1500 Вт, два послідовно з'єднані акумулятори типу MONBAT 12MVR100 з номінальною ємністю 100 А·год кожного. Слідкуюча система автоматичного управління має в своєму складі 2 давачі положення Сонця, контролер наведення на Сонце, 2-х крокових двигунів з редукторами, 2-х силових драйверів крокових двигунів і 4-х кінцевих вимикачів. Датчик положення Сонця, який буде використовуватися в сонячній установці, знаходиться в стадії розробки на кафедрі електричної інженерії ТНТУ ім. І. Пулюя і буде складатися з 3-х фотоелементів: правого, лівого і тилового.

Контролер наведення на Сонце побудований на базі мікроконтролера *Atmega16*. До складу контролера входить перетворювач постійної напруги, шести операційних підсилювачів, перетворювач RS-485 для зв'язку з персональним комп'ютером. На вхід драйверів крокового двигуна мікроконтролер подає сигнали щодо напрямку обертання крокових двигунів по координаті X та по координаті Y, а також кількість імпульсів для крокових двигунів за координатою X і координатою Y. Від чотирьох кінцевих вимикачів КВ1–КВ4 на контролер наведення на Сонце приходять сигнали з X1, Y1 та X2, Y2 про початкові та кінцеві положення рами конструкції за координатами X та Y.

Контролер підтримує наступні режими роботи: ручне регулювання положення рами від зовнішнього комп'ютера та автоматичне слідкування за Сонцем. У режимі ручного регулювання від зовнішнього комп'ютера кожне положення рами за обома координатами поступає в контролер через інтерфейс RS-485, тобто це є режим налаштування.

У режимі автоматичного слідування за Сонцем реалізується алгоритм точного наведення рами на Сонце за допомогою вимірювання струмів на фотоелементах давачів положення Сонця та переміщення рами кроковими електродвигунами за обома координатами. У випадку рівності струмів правого і лівого фотоелементів рама з сонячними панелями не переміщується, але якщо виникає різниця струмів, то здійснюється переміщення рами в такому напрямку, щоб компенсувати цю різницю. Наприклад, якщо всі 3 фотоелементи давача положення Сонця показують однакові струми, то сонячна панель перебуває у тіні і рама не переміщується. Якщо тильний фотоелемент показує найбільше значення струму, то Сонце світить ззаду рами і її потрібно повернути у сторону Сонця. У табл. 3.1 приведено алгоритм, який реалізовує описані переміщення, а величини  $I_A$ ,  $I_D$  та  $I_B$ ,  $I_E$  є струмами правої та лівої частини давачів,  $I_C$ ,  $I_F$  – тильної частини давачів

Таблиця 3.1 - Алгоритм наведення сонячних панелей на Сонце

Наведення за координатою X	Напрямок переміщення рами
$I_A - I_B \geq 0,05I_A$	<i>Вліво</i>
$I_A - I_B \leq 0,05I_A$	<i>Вправо</i>
$-0,05 \leq I_A - I_B \leq 0,05 I_A$	<i>Нема переміщення</i>
$I_A = I_B = I_C$	<i>Переміщення відсутнє</i>
$I_C > I_B, I_C > I_A$	<i>Переміщення відсутнє (панель затінена)</i>
Наведення за координатою Y	Напрямок переміщення рами
$I_D - I_E \geq 0,05I_D$	<i>Вліво</i>
$I_D - I_E \leq 0,05I_D$	<i>Вправо</i>
$-0,05 \leq I_D - I_E \leq 0,05 I_D$	<i>Переміщення відсутнє</i>
$I_D = I_E = I_F$	<i>Переміщення відсутнє (панель затінена)</i>
$I_F > I_E, I_F > I_D$	<i>Переміщення у початкове положення</i>

Коли рама не переміщується, то крокові двигуни не споживають енергії. Переміщення рами здійснюється дискретно через кожні три градуси за обома координатами до вирівнювання сигналів обох площин у кожному фотодавачі за

обома координатами. Поріг спрацьовування (похибка) між сигналами в похилих площинах фотоелементів давача, коли виконують переміщення за координатами, рівний 5% (налаштовується в контролері). Налаштування порогу спрацьовування є інструментом економії енергії при переміщенні рами та виключає зайвий реверс в крокових двигунах.

На рис. 3.3 показано фрагмент режиму налаштування робочого вікна програми керування контролером наведення на Сонце.

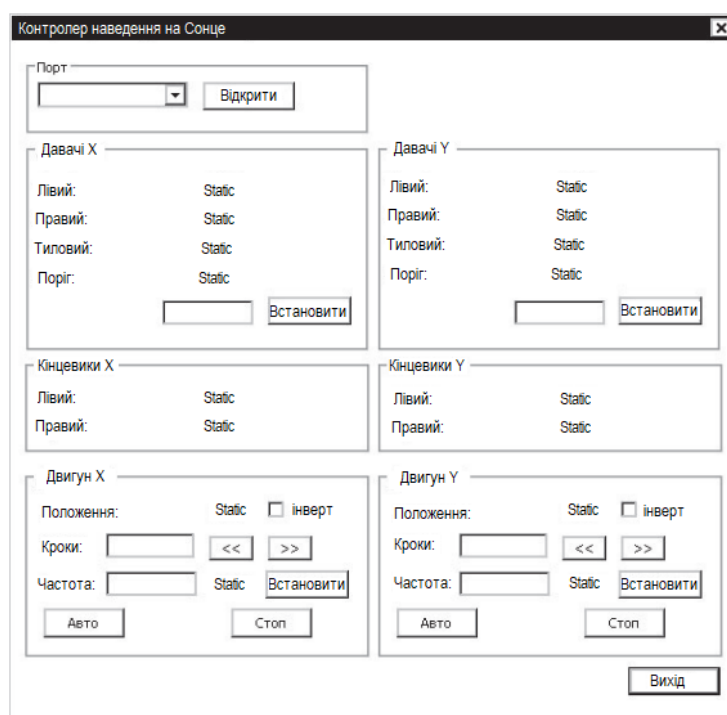


Рисунок 3.3 – Фрагмент робочого вікна програми керування контролером

### 3.4 Експериментальні дослідження сонячної установки

В програмному пакеті MATLAB було проведено моделювання та експериментальні досліджень енергетичних характеристик крокових електродвигунів [35]. Результати моделювання на автономній сонячній установці показали, що час переміщення по куту місця становить 55 с, а по азимуту 34 с при швидкості обертання крокових електродвигунів 180 об/хв, коли здійснюється половина добового циклу переміщень сонячної установки. Споживана потужність одного

двигуна із силовим драйвером на установці складає 50 Вт, а загальна споживана потужність електродвигунів при роботі установки за повний цикл 2 Вт·год.

Для регулювання потужності сонячних панелей використано контролер заряду розряду акумуляторної батареї, який має мале енергоспоживання та дозволяє підвищити ефективність використання сонячної батареї майже до 99%. На рис. 3.4 показано схему понижуючого перетворювача напруги, яку пропонується застосувати у контролері.

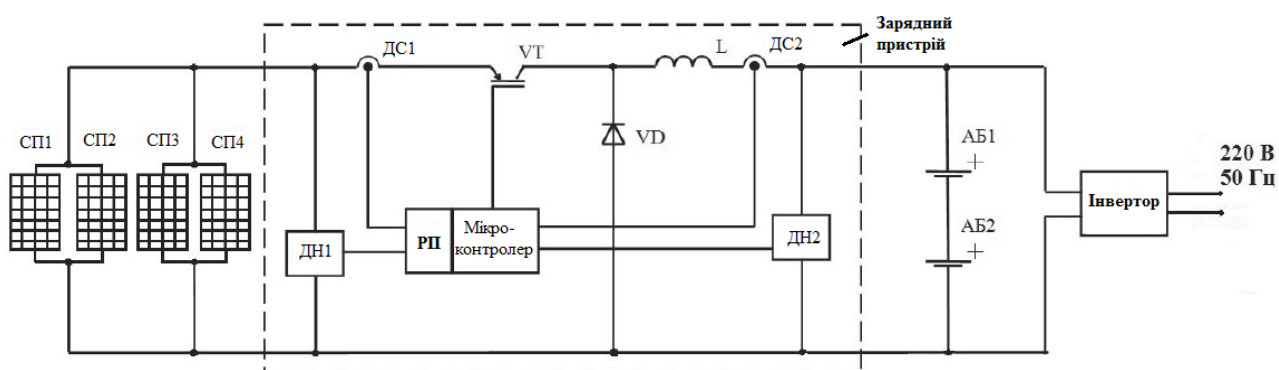


Рисунок 3.4 – Функціональна схема контролера акумуляторної батареї з функцією регулювання потужності сонячної панелі

В кваліфікаційній роботі розроблену схему контролера і в якості основного критерію було обрано максимальний коефіцієнт корисної дії, тобто необхідність забезпечення мінімуму втрат потужності. Виконані теоретичні розрахунки та моделювання в програмному пакеті MATLAB показали, що оптимальна частота перетворювача при мінімальних втратах знаходиться в межах від 40 до 50 кГц.

Управління зарядним пристроєм, який входить в розроблену схему контролера, виконує мікроконтролер типу Atmega128 з функціями інтерфейсу користувача та керуванням силового польового транзистора VT. Контролер може працювати у двох режимах роботи: ручному і автоматичному. Перший режим роботи використовується для стабілізації напруги сонячних панелей у фіксованій робочій точці. Автоматичний режим роботи використовується для регулювання потужності сонячних панелей. В цьому режимі здійснюється пошук робочої точки вольт-амперної характеристики з максимальною вихідною потужністю

сонячних панелей. На рис. 3.5 приведено розроблений в кваліфікаційній роботі алгоритм роботи зворотного зв'язку.

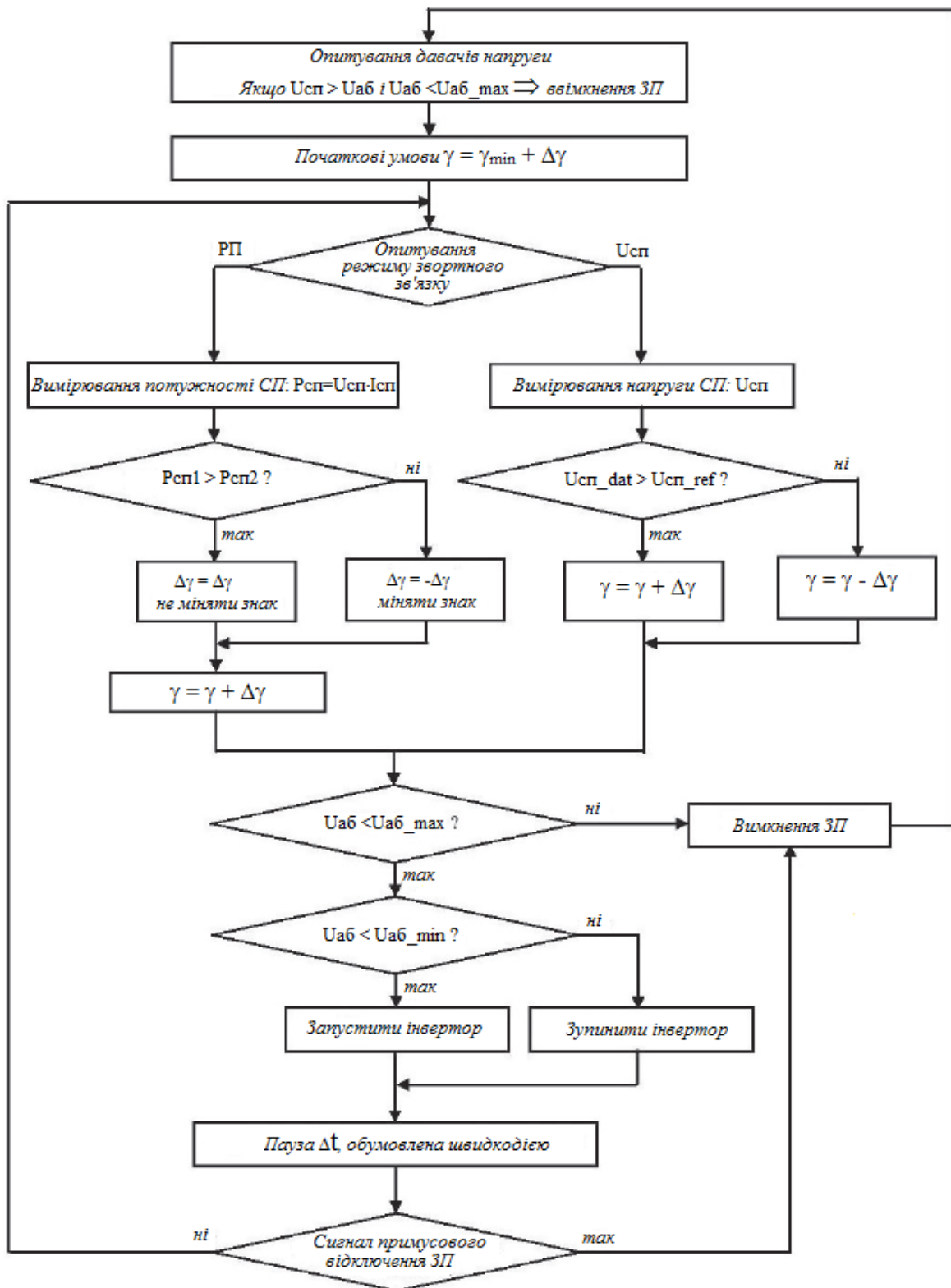


Рисунок 3.5 – Алгоритм роботи зворотного зв'язку

На першому етапі, перед включенням зарядного пристрою, здійснюється тестове опитування датчиків напруги (ДН1, ДН2). Коли напруга холостого ходу сонячних панелей є меншою за напругу акумуляторних батарей, то робота зарядного пристрою блокується. Також, коли акумуляторні батареї повністю заряджені, про що свідчить виміряна на них напруга, блокується робота зарядного пристрою.

У режимі регулювання потужності виконується опитування датчиків параметрів сонячних панелей (ДС1 і ДН1) та розрахунок їх вихідної потужності. Дальша йде порівняння отриманої виміряної величини вхідної потужності  $P_{сп1}$  з величиною потужності  $P_{сп2}$ , яку виміряли до введення керуючого впливу і програма відповідно до алгоритму приймає рішення щодо шляху переміщення робочої точки за вольт-ватною характеристикою. Якщо  $P_{сп1} > P_{сп2}$ , то знак впливу керування  $\Delta\gamma$  не змінюється, тобто робоча точка за вольт-ватною характеристикою має правильний напрямок руху. У випадку зменшення потужності  $P_{сп1} < P_{сп2}$  відбувається рух робочої точки вниз за вольт-ватною характеристикою і знак зміни напруги сонячних панелей змінюється на протилежний  $\Delta\gamma = -\Delta\gamma$ .

На рис. 3.6 показано процедуру процес пошуку точки максимуму потужності, коли нехтують похибками вимірювання потужності сонячних панелей.

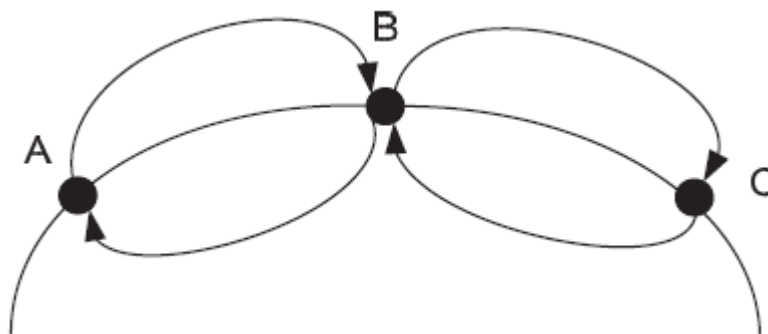


Рисунок 3.6 – Траєкторія руху робочої точки на вольт-ватній характеристиці сонячних панелей в околі точки максимуму

У початковому положенні робочої точки вольт-ватної характеристики у точці **A** здійснюється вимірювання відповідної їй потужності сонячних панелей та приймається рішення про підвищення напруги сонячних панелей, тобто згідно алгоритму виконується переміщення робочої точки в точку **B**, де буде виміряно наступна величина потужності  $P_{сп1}$ . Оскільки потужність в точці **B** є більшою за потужність в точці **A**, то робоча точка прямує далі до точки **C**. У цій точці потужність менша за потужність у точці **B**, відповідно змінюється знак збільшення напруги сонячних панелей і робоча точка повертається в точку **B**. Після порівняння величин потужності в точках **B** і **C** робоча точка переміщується в точку **A**, в якій порівняння величин потужності точок **A** і **B** знову змінює напрям руху робочої точки і вона рухається до точки **B**.

Отже бачимо, що в результаті визначення максимуму потужності, положення робочої точки знаходиться в околі трьох точок. Розроблений алгоритм характеризується постійним рухом робочої точки, що дозволяє визначити зміщення екстремуму вольт-ватної характеристики і знайти нове значення. В запропонованому алгоритмі передбачена пауза між подачею керуючого сигналу і опитуванням вимірювальних датчиків для завершення перехідних процесів, які виникають під дією керуючого сигналу та вимірювання величини встановленої потужності. Ця пауза введена для визначення частоти керуючих сигналів та часу пошуку екстремуму потужності, тобто відповідає за швидкодію зворотного зв'язку контролера. Варто відзначити, на обмеження швидкодії автономної сонячної системи впливає час перехідних процесів у силовому перетворювачі, який характеризується інерційністю згладжуючих фільтрів [36].

Для визначення максимальної допустимої швидкодії автономної сонячної системи було виконано її моделювання програмною середовищі MATLAB та досліджено перехідні процеси при стрибкоподібній зміні тривалості імпульсу керування  $\gamma$ . Отримані результати показали, що перехідний процес має експоненційний вигляд з постійною часу



$$\tau = \frac{L}{R_{AB}}, \quad (3.1)$$

де  $L$  – індуктивність вихідного фільтруючого дроселя;

$R_{AB}$  – внутрішній опір акумулятора.

Отже, вихідний дросель є визначаючим елементом часу перехідних процесів, відповідно, при розробці програми керування між подачею керуючого сигналу і вимірюванням вихідних параметрів потрібно передбачити паузу тривалістю 15 мс.

Для підтвердження теоретичних досліджень та математичного моделювання в програмному пакеті MATLAB була виконана робота щодо практичного впровадження автономної сонячної енергетичної установки для потреб дослідної лабораторії кафедри електричної інженерії ТНТУ ім. І. Пулюя.

На рис. 3.7 – 3.8. приведено фотографії розробленого першого етапу реалізації автономної сонячної енергетичної установки без слідкуючої системи.



Рисунок 3.7 – Сонячні панелі *Photovoltaic JKM280PP-60-V*



Рисунок 3.8 – Вхідний силовий щиток

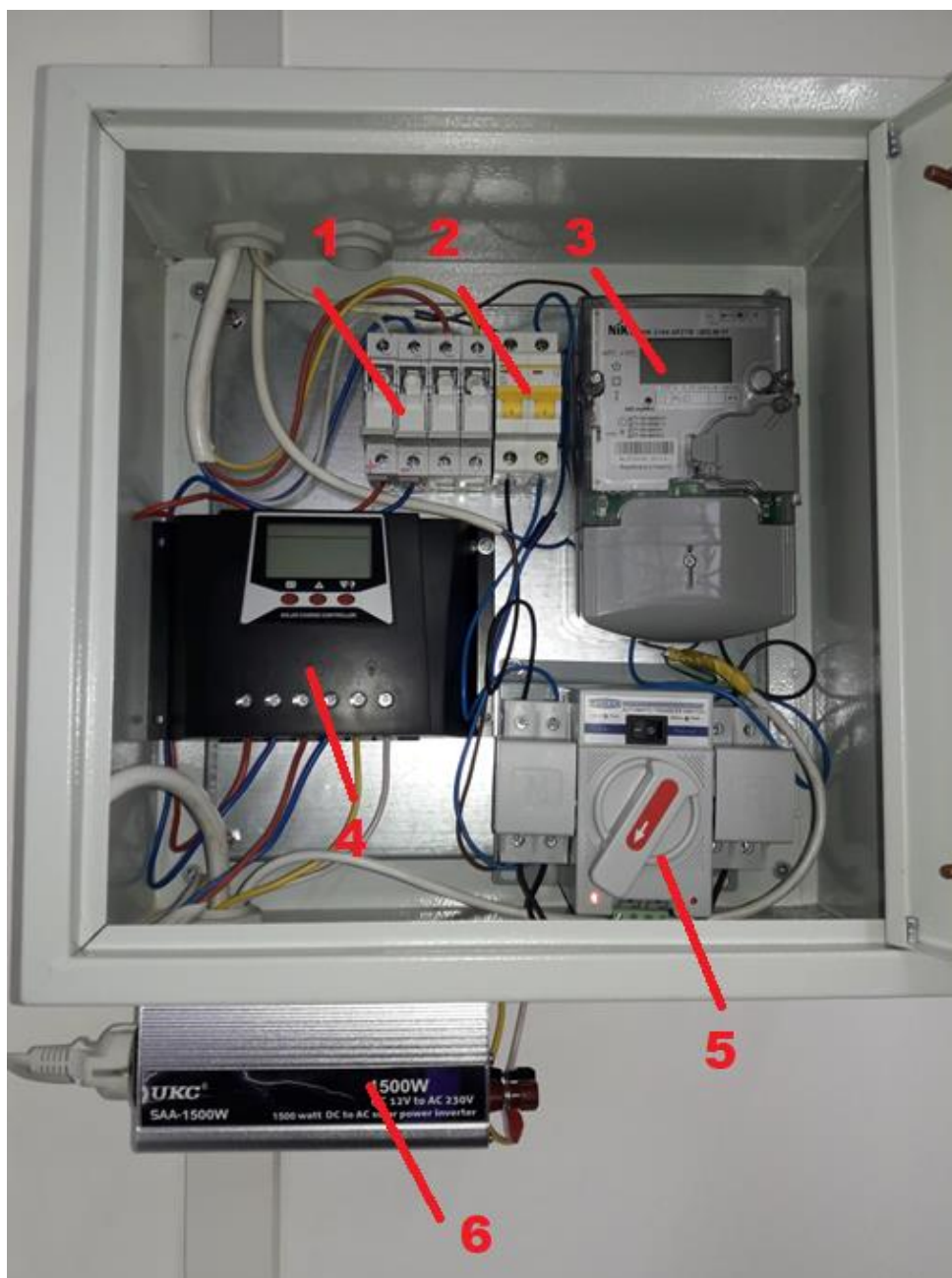


Рисунок 3.9 – Шафа системи управління:

1 – вимикач-запобіжник сонячних панелей (25 А); 2 - вимикач-автомат централізованої системи освітлення 220 В (15 А); 3 – лічильник електричної енергії NIK 2104 (однофазний); 4 – контролер заряду WP8048 PWM (80А, 12В/24В/48В); 5 – пристрій автоматичного включення резерву TOMZN (однофазний); 6 – інвертор UKC SAA-1500W (DC 12V to AC 230V)



Рисунок 3.10 – Акумуляторна батарея MONBAT 12MVR100 (12В, 100 А·год)



Рисунок 3.11 – Освітлення дослідної лабораторії від автономної сонячної установки

### 3.5 Висновки до розділу

1. Розроблено проект автономної сонячної енергетичної установки з максимальною вихідною потужністю 1500 Вт та регулюванням потужності сонячних панелей і їх автоматичним слідкуванням за Сонцем.

2. Результати проведеного моделювання показали, що ефективність використання сонячних панелей має бути в межах 95% з урахуванням режиму регулювання потужності.

3. Розроблено контролер заряду розряду акумуляторної батареї з малим енергоспоживанням, який дозволяє регулювати потужність та підвищити ефективність використання сонячних панелей до 99 %.

4. Розроблено алгоритм безперервно дискретного автоматичного слідкування за Сонцем на базі контролера наведення на Сонце, крокових двигунів та датчиків положення Сонця.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

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

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

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

Дослідження в області шуму показали, що шум є загальним біологічним подразником, впливаючи не тільки на слух, але, в першу чергу, на структуру головного мозку, викликаючи порушення в різних функціональних системах організму [38].

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

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

## 4.2 Розрахунок струму при одно- і двохополюсному дотику до струмопровідних частин сонячної установки

Проведемо розрахунок величини струму, що пройде крізь тіло людини при однополюсному і двохополюсному дотику до струмоведучих частин вітросонячного комплексу. Розглянемо трифазну мережу з глухозаземленою нейтраллю. При однополюсному дотику можливі два варіанти: людина торкається до нульового провідника і людина торкається до фазного провідника (однофазний дотик) [39]. Розглянемо перший варіант.

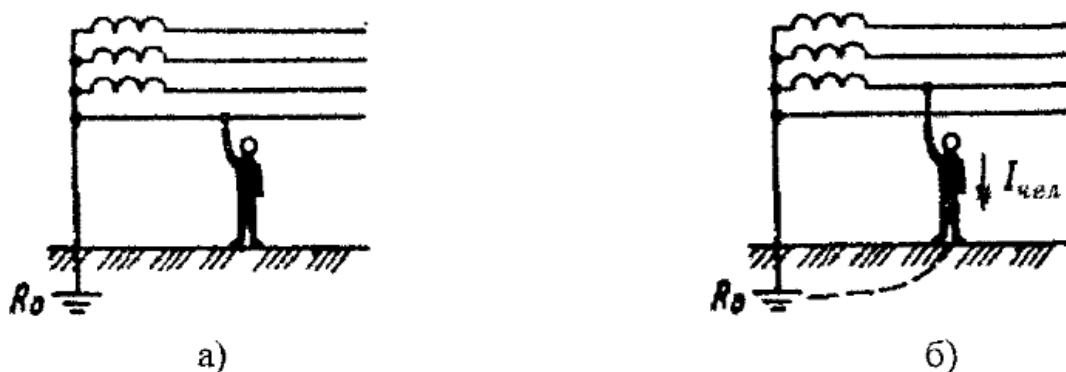


Рисунок 4.1 - Однополюсний дотик до мережі з глухозаземленою нейтраллю

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

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

де  $U_{\phi}$  – фазна напруга,

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

$R_{\Pi}$  – опір підлоги,

$R_B$  – опір взуття,

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

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

Тоді значення струму дорівнює:

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

Така величина струму є безпечною для організму людини.

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

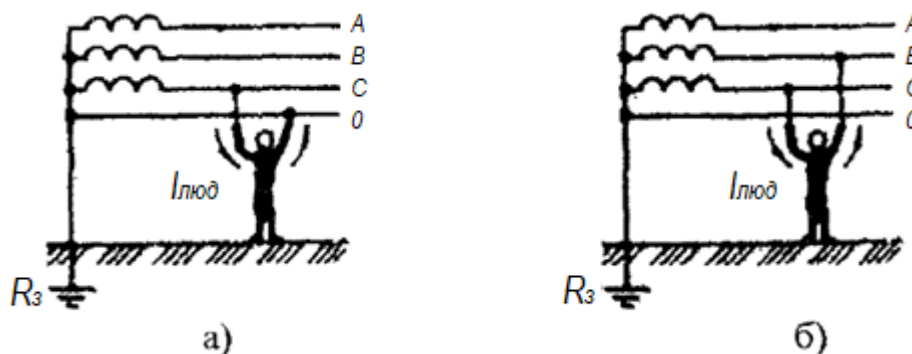


Рисунок 4.2 - Двополюсний дотик до мережі з глухозаземленою нейтраллю

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

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

Підставивши чисельні дані, одержимо:

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

Дане значення струму частотою 50 Гц є смертельним для людини.

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

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

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

Тоді

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

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

### 4.3 Заходи безпеки життєдіяльності для захисту працюючих

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

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

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

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



**Правила електробезпеки.** Електричні пристрої, що застосовуються в геліо-системі при монтажі та експлуатації, підпадають під норми та правила безпеки щодо ураження електричним струмом для установок напругою до 1000 В. Правила влаштування електроустановок для установок до 1000 В передбачають наступні правила безпеки [39]:

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

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

До безпечних джерел живлення можна віднести:

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

До основних заходів безпеки відносяться:

- ізоляція струмопровідних частин електричних пристроїв;
- прикриття струмопровідних деталей та частин захисними корпусами, кожухами тощо;
- розміщення струмопровідних деталей та частин у важкодоступних місцях;
- застосування дугових комірок в електричних апаратах;
- під час робіт слід користуватися слюсарно-монтажними інструментами з ізольованими рукоятками;
- місця під'єднання струмопровідних проводів ізолювати трубчастою або плитковою ізоляцією;

– між струмопровідними шинами та металевим корпусом передбачається відповідний ізоляційний проміжок;

– захисні чохла, кожухи або перегородки в приміщенні виконуються з матеріалів, що не дозволяють торкання до голих шин або затисків.

До додаткових заходів електробезпеки належать:

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

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

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

Відповідно до цього дотримуються наступних правил розміщення електроустаткування:

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

Апаратура управління розміщується в шафах, в спеціальному приміщенні – електрощитовій. Доступ до неї має тільки спеціальний персонал (електрики). Пускозахисна апаратура розташовується в технологічному коридорі в шафах управління ШУМ [41]. Корпус ШУМ заземлюється. Також заземленню підлягають корпуси електродвигунів. Основним показником виробничого травматизму є коефіцієнти частоти травматизму (Кч) і коефіцієнт тяжкості травматизму (Кт).

Коефіцієнт частоти відображає кількість нещасних випадків на тисячу працюючих. Він визначається формулою [40]:

$$K_{\text{ч}} = 1000 \times N/P,$$

де  $N$  – число нещасний випадок, од.;

$P$  – середньорічна чисельність працівників.

Коефіцієнт тяжкості травматизму показує кількість днів непрацездатності, що припадають на один нещасний випадок. Він визначається за формулою [40]:

$$K_{\text{т}} = T/M,$$

де  $T$  – втрачено днів, дн.;

$M$  – кількість потерпілих.

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

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

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

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

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

У першу чергу слід використовувати засоби колективного захисту. По відношенню до джерела збудження шуму колективні засоби захисту поділяються на засоби, що знижують шум у джерелі його виникнення, і засоби, що знижують шум на шляху його поширення від джерела до об'єкта, що захищається [42].

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

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі приведено результати теоретичних та практичних досліджень і вирішено науково-технічну задачу, що полягає в розробці автономної системи електропостачання дослідної лабораторії. На базі отриманих результатів та практичної розробки зроблено наступні висновки:

1. На даний час найоптимальнішим методом підвищення ефективності сонячних установок є впровадження слідкуючих систем за Сонцем з виконанням необхідних розрахунків та математичного моделювання.

2. Запропоновано методику розробки сонячних енергетичних установок на базі сонячних елементів, яку можна рекомендувати в якості інструмента для проведення дослідження та моделювання таких установок різної конфігурації з оцінкою їх ефективності та вибору відповідного варіанту практичної реалізації.

3. Розроблено проект автономної сонячної енергетичної установки з максимальною вихідною потужністю 1500 Вт та регулюванням потужності сонячних панелей і їх автоматичним слідкуванням за Сонцем.

4. Результати проведеного моделювання показали, що ефективність використання сонячних панелей може бути в межах 95% з урахуванням режиму регулювання потужності.

5. Розроблено контролер заряду розряду акумуляторної батареї з малим енергоспоживанням, який дозволяє регулювати потужність та підвищувати ефективність використання сонячних панелей до 99 %.

6. Розроблено алгоритм безперервно дискретного автоматичного слідкування за Сонцем на базі контролера наведення на Сонце, крокових двигунів та давачів положення Сонця.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сонячна енергетика: теорія та практика: монографія/ Й.С. Мисак, О.Т. Возняк, О.С. Дацько, С.П. Шаповал; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2014. – 340 с. : іл. – Бібліогр.: С. 323-337.
3. Сумарне випромінювання // Словник – довідник з екології : навч.-метод. посіб. / уклад. О. Г. Лановенко, О. О. Остапішина. — Херсон : ПП Вишемирський В.С., 2013. — С. 170-171
3. Нікульшин В.Р. Використання відновлювальних джерел енергії: навч. посіб. / В.Р. Нікульшин, В.В. Височин. – Одеса: Наука і техніка, 2006. – 244 с.
4. Сучасні технологічні процеси, обладнання та устаткування фотоелектричного перетворення сонячної енергії/: к.т.н. Будько В.І. – модуль - Київ: Національний технічний університет України («КПІ»), 2015 – 18 с. Режим доступу: [http://www.reee.org.ua/download/trainings/%D0%A2%D0%9C\\_10.pdf](http://www.reee.org.ua/download/trainings/%D0%A2%D0%9C_10.pdf)
5. Виссарионов В.И. Солнечная энергетика: учебное пособие для вузов / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин / под ред. В.И. Виссарионова. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2008. – 320 с.
6. European Energy Security Strategy // Brussels, 28.5.2014, COM(2014) 330 final. Режим доступу: <http://www.eesc.europa.eu/resources/docs/european-energy-security-strategy.pdf>
7. Перспективи розвитку світової електроенергетики до 2035 року // Електроенергія, передача і розподіл. – 2011, № 2, С.103.
8. История развития солнечной энергетики в именах и числах.– Режим доступу: <http://sunexperts.ru/istoriya-razvitiyasolnechnoj-energetiki>
9. Атлас енергетичного потенціалу поновлюваних джерел енергії України розроблено Інститутом електродинаміки НАН України за підтримки Державного комітету України з енергозбереження. – К., 2000.
10. Сонячні електростанції. Режим доступу: <https://www.atmosfera.ua/uk/sonyachni-elektrostancii/>

11. Кудря С.О., Головка В.М. Основы конструирования энергоустановок з відновлюваними джерелами енергії – Київ: НТУУ «КПІ», 2011. – 202 с.
12. Типи сонячних панелей. [Електронний ресурс]: atmosfera.ua, база знань. URL: <https://www.atmosfera.ua/pvsolar/typy-solnechnyx-panelej/>
13. Сонячні електростанції [Електронний ресурс]: rentechno.ua, блог. URL: <https://rentechno.ua/ua/solar.html>
14. Промислові сонячні фотоелектричні станції. Режим доступу: <https://rentechno.ua/ua/>
15. Стан, проблеми та перспективи розвитку сонячної енергетики України. Маляренко В.А., Тимченко С.П., Харківська національна академія міського господарства.
16. Стратегія національної безпеки України [Електронний ресурс] // Затверджено Указом Президента України від 26 травня 2015 року №287/2015. Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/287/2015>
17. Класи якості сонячних панелей: в чому відмінності. [Електронний ресурс]: eenergy.com.ua, новини. URL: <http://eenergy.com.ua/solar/klassy-yakosti-sonyachnyh-panelej>
18. Ефимов В.П. Фотопреобразователи энергии солнечного излучения нового поколения // ФІП ФІП PSE, 8(2), (2010).
19. Ахметшин, А.Т. Солнечные установки с неподвижным концентратором и мобильной передвижной системой с фотоэлектрическим преобразователем / А.Т. Ахметшин, И.И. Галимарданов // Материалы XLIX Международной научно-технической конференции «Достижения науки - агропромышленному производству». – Челябинск: ЧГАА, 2010. – Ч.2. – С. 278- 282.
20. Лукманов, Р.Л. Разработка метода расчета энергетических показателей неподвижного концентратора солнечной энергии / Р.Л. Лукманов, И.И. Галимарданов, А.Т. Ахметшин // Известия Международной академии аграрного образования. – СПб, 2013. – №17 (2013). – С. 249 – 252.

21. Б. Оробчук, А. Панькевич. Модель автономної сонячної електростанції для малих сільськогосподарських підприємств. VII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» – Тернопіль, ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2018 р.

22. Бородін І.Ф. Автоматизація технологічних процесів: навч. пос. для студ. ВНЗ / І.Ф. Бородін, Ю.А. Судник. – М.: Колос, 2004. – С. 10 -13

23. The site of the company Traxle [Електронний ресурс]. URL: <http://www.solar-trackers.com/>

24. Оробчук, Ф. Аріаіфо. Математична модель акумуляторної батареї сонячної водопідйомної установки // Актуальні питання розвитку агропромислового комплексу. ВП НУБІП України «Бережанський агротехнічний інститут». - Бережани, 2016 р.

25. Оробчук, М. Горохівський. Інформаційно-телеметрична система обліку споживання електроенергії // Міжнародної науково-технічної конференція «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя. - Тернопіль, ТНТУ імені Івана Пулюя, 2018 р.

26. Solar Energy. Bloomberg. / Електронний ресурс. <https://www.bloomberg.com/quicktake/solar-energy/>

27. Бушуев В.М., Деминский В.А. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций. Учебное пособие для вузов.– М.: – Телеком, 2011.

28. Основи будови та експлуатації акумуляторних батарей : навч. посіб. / М. Б. Шелест, П. І. Гайда ; М-во освіти і науки України, Сум. держ. ун-т. — Суми: 2014. — 210 с.

29. Сонячна енергетика: огляд галузі. [Електронний ресурс] / за матеріалами компанії Nitol Solar Limited. – Режим доступу World Wide Web: <http://nitolsolar.com/rusolarenergy/>

30. Meteonorm Version 7 Handbook / Електронний ресурс <http://www.meteonorm.com>



31. Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н., Химич А.П. Расчет системы автономного энергоснабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей. – Симферополь: Национальная академия природоохранного и курортного строительства, 2010.

32. Лукутін Б.В. Відновлювальні джерела енергії. Електронний навчальний посібник. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: URL: <https://solar.kiev.ua/goto-vie-sistemy>

33. Контроллер заряда для солнечной батареи / Электронный ресурс <https://svetuvras.ru/solnechnye-batarei/kontrollor-zaryada-solnechnoj-batarei.html>

34. Шиняков Ю.А. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок / Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, О.Е. Аркатова // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2 (22). – Ч. 2. – С. 102-107

35. Черних І.В. Моделювання електротехнічних пристроїв в MATLAB, SimPowerSystems і Simulink . 1-е видання, 2007 рік, 288 с.

36. V. Orobchuk, I. Sysak, S. Babiuk. Development of simulator automated dispatch control system for implementation in learning process // 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). Bucharest, 21-23 Sept. 2017

37. Основи охорони праці: підручник для студентів вищих навчальних закладів // За ред. д.т.н., проф. М.П. Гандзюка - К.: Каравела, 2003. - 408 с

38. Лут М.Т. Охорона праці в галузі. Методичні вказівки щодо виконання розділу у дипломних проектах студентів зі спеціальності 7.091901 «Енергетика сільськогосподарського виробництва». К.:НАУ,2000.-136с.

39. Електроенергетика та охорона навколишнього середовища. Функціонування енергетики в сучасному світі / Т.О. Бурячок, З.О. Буцьо, Г.Б. Варламов// К.: НТУУ «КПІ», 2010.-С.34-60

40. Лапін В.М., Безпека життєдіяльності людини, - Львів: ЛБК НБУ; Київ: Знання, 2000.-188 с.

41. Влияние электромагнитного излучения на жизнедеятельность человека и способы защиты от него. Учебное пособие – Захаров С. Г., Каверзнева Т. Т. СПб.: СПбТТУ, 1992, 74 с., ил.

42. Закон України “Про захист людини від надзвичайних ситуацій техногенного та природного походження”, ВРУ, № 1809 – 111. – К., 2000.

43. Євтух П.С., Буняк О.А., Оробчук Б.Я. Решетник В.Я. Зміст та тематика дипломних проектів (робіт) за спеціальністю 7.05070103 (8.05070103) електротехнічні системи електроспоживання // Методичні вказівки. - Тернопіль, ТНТУ імені Івана Пулюя, 2012.

