

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____ 2023р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ
ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**« Дослідження можливостей сонячної та вітрової енергії
для підвищення енергоефективності підприємств
сільськогосподарського виробництва»**

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу магістратури, групи ЕНМ-22М
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Сергій ЮЩЕНКО
« ____ » _____ 2023 р.

Керівник роботи професор, к.т.н.
_____Петро ПЛЄШКОВ
« ____ » _____ 2023 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Енергетичний менеджмент»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Ющенко Сергія Олександровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження можливостей сонячної та вітрової енергії для підвищення енергоефективності підприємств сільськогосподарського виробництва
Exploring the potential of solar and wind energy to improve the energy efficiency of agricultural enterprises

2. Керівник роботи (проекту) Плішков Петро Григорович, к.т.н., професор

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 25.12.2023 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) _____
Вступ; Перспективи підвищення енергетичної ефективності сільськогосподарських підприємств; Потенціал сонячної та вітрової енергетики України; Енергетичні характеристики вітрової та сонячної енергії і методи їх оцінки; Розробка комбінованої системи електропостачання сільськогосподарського підприємства; Комп'ютерне моделювання режимів роботи комбінованої СЕП сільськогосподарського підприємства; Розрахунок техніко-економічних показників розробленої комплексної електроенергетичної системи; Охорона праці; Висновки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	9.10.23	
2	<i>Перспективи підвищення енергетичної ефективності сільськогосподарських підприємств</i>	15.10.23	
3	<i>Потенціал сонячної та вітрової енергетики України</i>	22.10.23	
4	<i>Енергетичні характеристики вітрової та сонячної енергії і методи їх оцінки</i>	4.11.23	
5	<i>Розробка комбінованої системи електропостачання сільськогосподарського підприємства</i>	12.11.23	
6	<i>Комп'ютерне моделювання режимів роботи комбінованої СЕП сільськогосподарського підприємства</i>	18.11.23	
7	<i>Розрахунок техніко-економічних показників розробленої комплексної електроенергетичної системи</i>	24.11.23	
8	<i>Охорона праці</i>	02.12.23	
9	<i>Висновки</i>	10.12.23	
10	<i>Оформлення пояснювальної записки ВКР</i>	22.12.23	
11	<i>Оформлення презентаційної частини ВКР</i>	25.12.23	

Дата видачі завдання
Підпис керівника _____

«___» _____ 2023 р.
Петро ПЛІШКОВ

Завдання прийнято до виконання
Підпис здобувача _____

«___» _____ 2023 р.
Сергій ЮЩЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 106 с.; 44 рис.; 15 табл.; 20 джерел.

Ющенко С. О. Дослідження можливостей сонячної та вітрової енергії для підвищення енергоефективності підприємств сільськогосподарського виробництва. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Енергетичний менеджмент». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2023 рік.

Об'єктом досліджень є альтернативні джерела енергії.

Предмет досліджень – ефективність використання сонячних та вітрових електроустановок для сільськогосподарських підприємств.

Головною метою цієї роботи є визначення технічних, організаційних і економічних факторів, які можуть сприяти збільшенню енергетичної автономії підприємств у сфері агропромислового комплексу. Це досягається за допомогою використання вітрової та сонячної енергії. Для досягнення цієї мети було поставлено кілька завдань, зокрема провести аналіз переваг і недоліків використання вітрової та сонячної електрогенерації, а також вивчити технічні та технологічні можливості використання вітрових і сонячних електростанцій невеликої потужності, базуючись на сучасному рівні технічного обладнання та природнокліматичних умовах України.

Під час проведеного дослідження було успішно вирішено науково-технічне завдання щодо розробки системи електропостачання сільськогосподарського підприємства. Ця система ґрунтується на використанні комбінованої системи, основаної на сонячній енергії. Виявлено, що в умовах міста Кропивницький найбільш ефективним варіантом є інтеграція сонячних енергосистем в складі комбінованої системи електропостачання.

Проведене комп'ютерне імітаційне моделювання визначило можливість та точки приєднання сонячної установки до енергосистеми.

Ключові слова: система електропостачання, альтернативні джерела енергії, сонячні установки, вітрові установки, енергетичні потенціали, фотоелектричні модулі.

ABSTRACT

Qualification work: 106 p.; Fig. 44; 15 tables; 20 sources.

Yushchenko, S.O. Study of the possibilities of solar and wind energy to increase the energy efficiency of agricultural production enterprises. - Manuscript.

Master's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Energy Management". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023.

Alternative energy sources are the object of research.

The subject of research is the efficiency of using solar and wind power plants for agricultural enterprises.

The main goal of this work is to determine the technical, organizational and economic factors that can contribute to increasing the energy autonomy of enterprises in the field of agro-industrial complex. This is achieved through the use of wind and solar energy. To achieve this goal, several tasks were set, in particular, to analyze the advantages and disadvantages of using wind and solar power generation, as well as to study the technical and technological possibilities of using wind and solar power plants of small capacity, based on the modern level of technical equipment and natural climatic conditions of Ukraine.

During the conducted research, the scientific and technical task of developing the electricity supply system of the agricultural enterprise was successfully solved. This system is based on the use of a combined system based on solar energy. It was found that in the conditions of the city of Kropyvnytskyi, the most effective option is the integration of solar power systems as part of a combined power supply system.

The conducted computer simulation modeling determined the possibility and connection points of the solar installation to the power system.

Keywords: power supply system, alternative energy sources, solar installations, wind installations, energy potentials, photovoltaic modules.

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	8
1	ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПІДПРИЄМСТВ..	10
2	ПОТЕНЦІАЛ СОНЯЧНОЇ ТА ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ..	21
2.1.	Потенціал сонячної енергії.	21
2.2.	Класифікація сонячних енергетичних установок та їх особливості....	23
2.3.	Потенціал енергії вітру.	27
2.4.	Вітроенергетичні установки.	32
3	ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІТРОВОЇ ТА СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ І МЕТОДИ ЇХ ОЦІНКИ.....	39
3.1.	Принцип дії і класифікація ВЕУ.	39
3.2.	Швидкість та силові властивості вітру.....	40
3.3.	Розподіл швидкості вітру.....	41
3.4.	Графік розподілу ймовірностей Вейбула.	42
3.5.	Характеристика середньої швидкості вітру.....	43
3.6.	Корінь середньої кубічної швидкості.....	44
3.7.	Функція розподілу енергії.....	45
3.8.	Використання цифрових накопичувачів для отримання вітроенергетичних характеристик.	45
3.9.	Ефект висоти.	46
3.10.	Аеродинамічний розрахунок ротора вітроустановки.	48
3.11.	Методи розрахунку ресурсів сонячної енергетики.	54
4	РОЗРОБКА КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПІДПРИЄМСТВА	58
4.1.	Комбіновані системи електропостачання з фотоелектричними установками.	58
4.2.	Структура комбінованої системи електропостачання.....	61
4.3.	Визначення доцільного кута нахилу сонячної панелі для географічних умов Кіровоградської області.	63
4.4.	Розрахунок параметрів СЕС та вибір обладнання комбінованої системи електропостачання.....	68

5	КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ КОМБІНОВАНОЇ СЕП СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПІДПРИЄМСТВА.....	73
5.1.	Математична модель фотоелектричної установки.....	73
5.2.	Комп'ютерні імітаційні моделі комбінованої системи електропостачання з СЕС.....	79
5.3.	Комп'ютерне моделювання режимів роботи комбінованої системи електропостачання з ВДЕ.	82
6	РОЗРАХУНОК ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОЗРОБЛЕНОЇ КОМПЛЕКСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ.....	89
6.1.	Визначення кошторисної вартості схеми з автономним електропостачанням.....	89
6.2.	Визначення кошторисної вартості варіанту із спорудженням лінії електропередачі.	91
7	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	94
7.1.	Нормативні документи щодо охорони праці під час використання сонячних батарей.....	94
7.2.	Вимоги безпеки при використанні сонячних батарей.	97
7.3.	Робоче місце та його ризики.....	97
7.4.	Сходи та їх безпека.	98
7.5.	Рекомендації щодо поводження з сонячними панелями.	99
7.6.	Запобігання падінню з висоти.	100
7.7.	Електрична безпека.	100
	ВИСНОВКИ.....	102
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	104

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

СЕУ – сонячна енергетична установка
СВ – сонячне випромінювання
СЕС – сонячна електростанція
ВЕС – вітрова електростанція
СМ – світловий майданчик
АЕС – атомна електростанція
СР – сонячна радіація
ОЕС - об'єднана енергосистема
АПК – агропромисловий комплекс
АСУ – автоматизована система управління
ВДЕ – відновлювальні джерела енергії
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина
НВДЕ – нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії
НДЕ – нетрадиційні джерела енергії
КЕС – комплексна енергетична система
КЕЕС – комплексна електроенергетична система
ПП – приймаюча площа
ВЕУМП - вітроелектричні установки малої потужності
ГЕС - гідроелектростанції

ВСТУП

Використання відновлюваних джерел енергії дедалі набуває поширення в агропромисловому комплексі (АПК). Застосування сонячної та вітрової енергії визначається не лише як екологічна альтернатива конвенційним джерелам енергії, але і як потенційний катализатор різноманітних економічних та екологічних вигід.

Однією з ключових переваг використання відновлюваної енергії в АПК є економія коштів. Використання сонячної, вітрової та гідроелектроенергії дозволяє фермерам оптимізувати витрати на енергію, що підвищує їх конкурентоспроможність на ринку. Безпосередньо відновлювані джерела енергії сприяють зменшенню витрат, пов'язаних із використанням палива.

Застосування відновлюваних джерел енергії в агропромисловому комплексі (АПК) забезпечує фермерам стійке джерело енергії. На відміну від традиційних джерел, відновлювані джерела енергії не піддаються коливанням цін та доступності. Це гарантує фермерам стабільне постачання енергії для оптимізації своїх потреб.

Загалом використання відновлюваної енергії може значно зменшити вплив, який сільське господарство має на навколишнє середовище. Використання таких джерел енергії дозволяє фермерам зменшити свій вуглецевий відбиток та сприяти збереженню природи. Крім того, відновлювана енергія може сприяти зменшенню забруднення повітря та води, що має позитивний вплив на здоров'я місцевої громади.

Враховуючи постійну актуальність проблеми зміни клімату на світовому рівні, необхідність використання відновлюваних джерел енергії стає все більш очевидною. Але навіть при широкому застосуванні зеленої енергетики у житловому та комерційному секторах, її вплив на продуктивність сільського господарства досі залишався недостатньо вивченим.

Проте недавні дослідження свідчать, що джерела зеленої енергії можуть мати значний вплив на продуктивність сільського господарства. Зокрема, наукові висновки демонструють, що сонячна енергія може бути використана для підвищення врожайності, зменшення використання води та поліпшення якості ґрунту.

Наприклад, сонячна енергія може бути використана для живлення систем поливу, що дозволяє фермерам оптимізувати використання води та одночасно забезпечити здорові та щедрі врожаї. Крім того, сонячна енергія може служити джерелом живлення для сенсорів ґрунту, які в змозі моніторити рівень вологості в ґрунті та повідомляти фермерів про необхідність та обсяг поливу для сільськогосподарських культур.

Поза збільшенням врожайності, сонячна енергія може ефективно зменшувати витрати на енергію, пов'язані з аспектами сільськогосподарського виробництва. Застосування сонячної енергії для живлення сільськогосподарської техніки, такої як трактори і комбайни, а також теплиць та інших аграрних структур, може призвести до значного скорочення витрат, звільняючи велику кількість коштів. Це, в свою чергу, дозволяє реінвестувати ці заощаджені кошти у сільськогосподарську діяльність і підвищувати загальну продуктивність.

Загалом, джерела зеленої енергії, зокрема сонячна енергія, можуть істотно вплинути на продуктивність сільського господарства. Шляхом зниження витрат на енергію, збільшення врожайності та покращення якості ґрунту, сонячна енергія може допомогти працівникам АПК максимально розвинути свою діяльність і забезпечити більш стабільне майбутнє для сільськогосподарської галузі.

1 ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПІДПРИЄМСТВ

На сьогодні, агропромисловий комплекс відзначається як одна з ключових і стійких складових доходів до бюджету української економіки. Цей сектор визначає соціально-економічний розвиток країни та є інтегрованою виробничо-економічною системою. Він об'єднує різноманітні галузі, такі як сільське господарство, промисловість, наука, виробництво та освіта, зорієнтовані на отримання, транспортування, зберігання, переробку і реалізацію сільськогосподарської продукції.

Згідно з результатами стратегічних досліджень Організації Об'єднаних Націй з продовольства та сільського господарства (ФАО), світовий ринок продовольчих товарів показує тенденцію до зростання [5]. Це створює термінову потребу у збільшенні обсягів виробництва і відкриває перспективи для розвитку національної економіки.

Враховуючи пріоритетність агропромислового комплексу в Україні та тенденції світового ринку, Кабінет Міністрів України схвалив «Стратегію розвитку експорту продукції сільського господарства, харчової та переробної промисловості України на період до 2026 року» [5]. Основна мета цієї стратегії - забезпечення активної присутності України на світовому ринку продовольства, ураховуючи зростаючий зовнішній попит та наявний експортний потенціал галузі. Для досягнення цієї мети в нормативно-правовому акті визначено цілі та намічено напрями їх реалізації, зокрема підвищення конкурентоспроможності виробленої продукції та сприяння використанню інноваційних підходів і нових технологій під час виробництва.

Проте на сучасному етапі розвитку агропромислового комплексу в Україні значущою перешкодою для забезпечення належного рівня конкурентоспроможності підприємств та їх продукції на міжнародному ринку є високі витрати енергоресурсів. Повна залежність від

електроенергетичної системи, що в основному використовує традиційні види палива, має низку недоліків, таких як екологічне забруднення навколишнього середовища, загальна тенденція до зростання цін та нестача власних первинних енергетичних ресурсів у країні. Це створює ризики для ефективного функціонування стратегічно важливого сектора економіки, обґрунтовуючи актуальність досліджень, спрямованих на оптимізацію структури енергоспоживання, зокрема через впровадження альтернативних джерел енергії на підприємствах агропромислового комплексу України.

На підприємствах агропромислового комплексу в Україні основними напрямками використання сонячної та вітрової енергії є:

- Виробництво електроенергії за допомогою вітрових електростанцій (ВЕС) та сонячних електростанцій (СЕС).
- Підігрів води у геліоколекторах (ГВК) для використання на тваринницьких та молочнотоварних фермах та для технічних потреб на переробних підприємствах.
- Застосування сонячного випромінювання при вирощуванні овочів та фруктів у теплицях та для проведення процесу їх сушіння [16].

Загальний міжнародний досвід впровадження технологій вітрової та сонячної енергетики малої потужності для забезпечення енергетичної автономії агропромислових підприємств вказує на основні переваги використання вітрових установок (ВЕС), сонячних електростанцій (СЕС) та геліоколекторів для нагріву води (ГВК):

- Зменшення екологічного впливу на навколишнє середовище порівняно з традиційними методами вироблення електроенергії, завдяки уникненню викидів шкідливих речовин (діоксиду сірки, оксидів азоту, пилу, парникових газів) та майже повній відсутності відходів.
- Стабільність та передбачуваність витрат на 1 кВт·год електроенергії незалежно від зовнішніх макроекономічних чинників та геополітичної ситуації у світі.

- Безмежні ресурси вітрового потоку та сонячного випромінювання, навпаки до традиційних джерел вироблення електроенергії.
- Повна автономія вітрогенераторів та геліоколекторів, що виключає необхідність використання інших джерел енергії для їх функціонування.
- Висока ергономічність, зумовлена низькою трудомісткістю монтажу та обслуговування обладнання малої потужності, компактність площі розміщення вітрових енергетичних установок, можливість встановлення сонячних панелей та геліоколекторів на невикористовуваних поверхнях (дахи будівель, земельні ділянки, інші не використовувані для виробничих цілей місця) [14].

Поміж визначеними перевагами використання вітрової та сонячної енергії фахівці також відзначають недоліки та труднощі, які виникають при впровадженні цих видів альтернативних джерел:

- Складність передбачення графіка вироблення енергії, що виникає від повної залежності від погодних умов, пори року та інших природних факторів функціонування вітрових та сонячних енергогенеруючих установок.
- Проблема накопичення та збереження виробленої електроенергії установками малої потужності, що передбачає використання дорогих технічних засобів та обладнання.
- Великі капітальні витрати на будівництво нових сонячних електростанцій (СЕС) та вітрових електростанцій (ВЕС).
- Низький коефіцієнт використання встановленої потужності порівняно з традиційними електростанціями, що призводить до відносно невеликого виходу електроенергії.
- Потенційна небезпека загибелі птахів через їх потрапляння в зону дії обертових лопатей вітрогенераторів та високий рівень шуму під час їх роботи [15].

Очевидно, що вказані недоліки призводять до значного уповільнення процесів диверсифікації джерел теплової та електричної енергії в Україні,

зокрема через конверсію вітрової та сонячної енергії. Це призвело до того, що Україна досягла лише 1,7% частки використання відновлюваних джерел енергії (енергії сонця, вітру та біомаси) в загальній структурі енергогенерації (рис. 1.1) [17]. У той час як високорозвинені країни Європи виробляють від 15% до 52% енергії від нестабільних (стохастичних) джерел, таких як сонце та вітер (рис. 1.2) [18].

Такий стрімкий розвиток сектора альтернативної енергетики у світі та загальна тенденція до зростання вартості традиційних паливних ресурсів вимагають перегляду вказаних недоліків, оскільки в сучасний час прогресивні технології та інновації поступово роблять їх менш актуальними, дозволяючи частково або повністю їх подолати.

Висловлення про обмежену застосовність вітрової та сонячної енергії в сільському господарстві через можливі втрати потужності внаслідок непередбачуваних погодних умов є неправомірним у контексті інтеграції декількох енергетичних установок з різними рівнями потужності. У випадку коливань генерації, які можуть виникнути внаслідок погодних факторів, встановлені установки можуть взаємодіяти таким чином, що компенсують одна одну і забезпечують стабільну електропостачаність системи. Такий підхід дозволяє збалансувати можливі коливання та гарантує надійність енергетичного постачання у виробничих процесах сільськогосподарських підприємств..

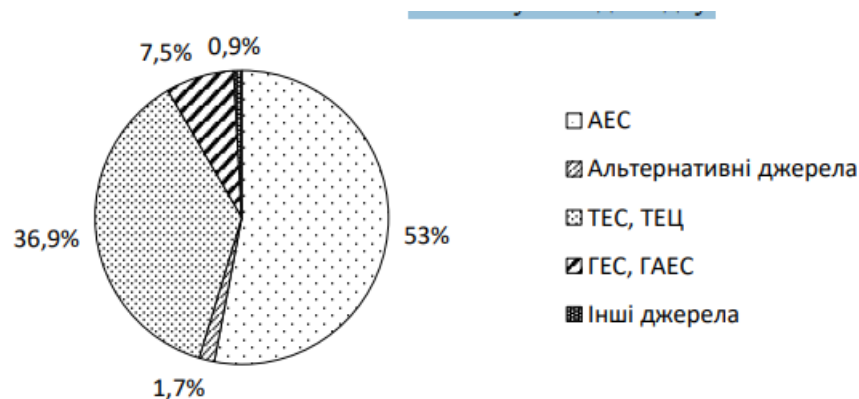


Рисунок 1.1 - Структура виробництва електроенергії в Україні.

Джерело: на основі даних [17].

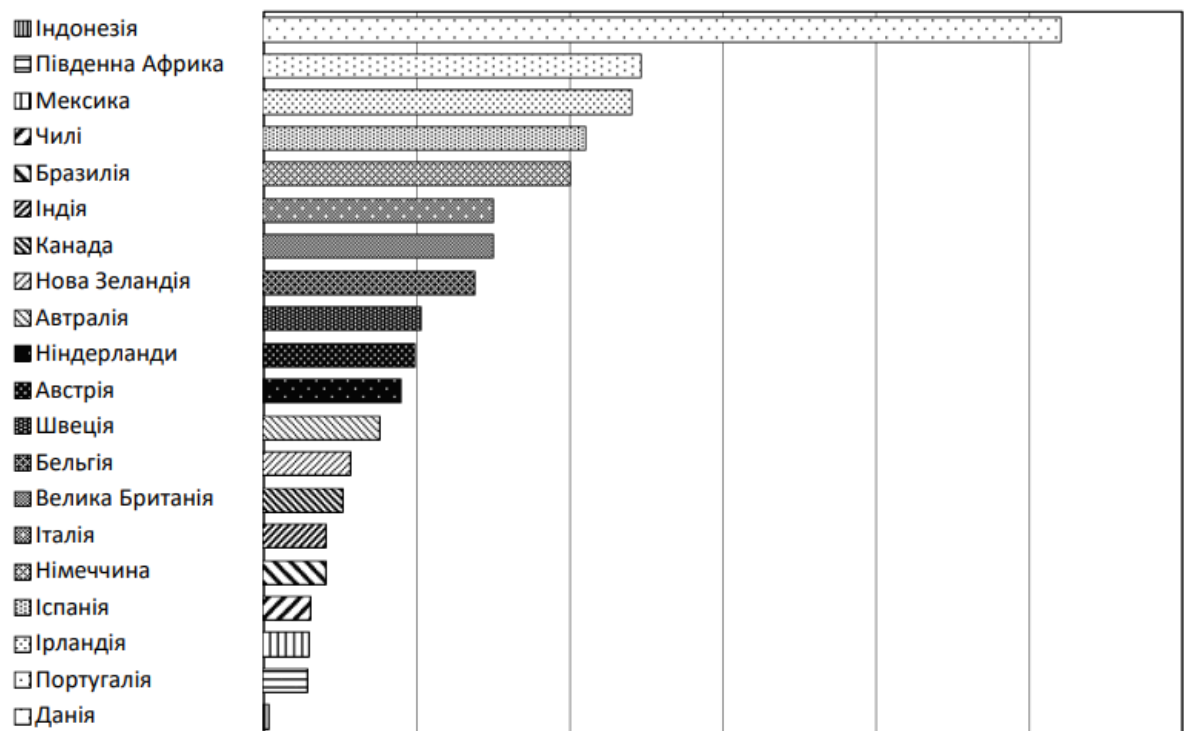


Рисунок 1.2 - Частка стохастичних альтернативних джерел енергії (вітрова та сонячна) в річній генерації електроенергії для ряду країн світу.

Джерело: на основі даних [18].

При використанні комбінованих вітросонячних систем графік вироблення електричної енергії стає ще більш стійким, стохастичність зменшується, і важливі зміни у виробництві енергії, як правило, відбуваються протягом години. Це можна врахувати шляхом регулювання виробничих процесів та застосування проєктних рішень щодо зберігання електричної енергії. Крім того, розвиток сучасних інтелектуальних інформаційних систем дозволяє використовувати методи метеорологічного моделювання для точного прогнозування погодних умов з високою достовірністю.

У 2018 році експерти корпорації Lazard Ltd. здійснили аналіз, в результаті якого був визначений показник сукупної вартості електроенергії (LCOE — Levelized Costs of Electricity). Цей показник відображає динаміку загальних витрат протягом усього життєвого циклу, враховуючи витрати на проєктування, виробництво, модернізацію, експлуатацію та утилізацію

відпрацьованих елементів енергетичних установок. За період з 2016 по 2018 роки рентабельність вітрових і сонячних електростанцій збільшилася на 7,5%, враховуючи капітальні інвестиції. Водночас витрати на розвиток проектів з вугільних технологій зменшили рентабельність, а витрати на розширення об'єктів атомної генерації зросли.

Вартість капітальних витрат за один кіловат встановленої потужності коливається в межах 1100–1375 доларів США для сонячних електростанцій (СЕС) та 1200–1650 доларів США для вітрових електростанцій (ВЕС) [19]. Зростання потужностей альтернативної енергетики на світовому рівні призводить до інтенсифікації конкуренції на ринку технологій вітрової та сонячної енергетики. Це сприяє зниженню цін на обладнання для конверсії енергії вітру та сонця, що в свою чергу підвищує показники коефіцієнта встановленої потужності. На сьогодні технологічно можливо досягти значень коефіцієнта використання встановленої потужності для СЕС в діапазоні 21–30% (кремнієві панелі) та 23–32% (тонкоплівкові панелі), а для ВЕС – від 38% до 55%.

Ще однією перешкодою для розвитку малої вітрової та сонячної електроенергетики в аграрному секторі України є твердження про обмежений природнокліматичний потенціал країни, особливо в контексті ефективності використання вітрової енергії (обмежена швидкість та непостійність вітрових потоків) та можливість оптимального функціонування вітрових електростанцій лише на обмежених територіях.

На сьогодні доступні технічні рішення вітрогенерації вітчизняних та іноземних виробників, які розв'язують проблему низького та стохастичного вітрового навантаження (див. рис. 1.3). Ці рішення можуть бути використані для забезпечення енергетичної автономності агропромислових підприємств в Україні, незалежно від їхнього розташування в різних регіонах.

Вертикальні вітрогенератори (див. рис. 1.3 а, б) мають декілька ключових переваг. Вони не вимагають специфічного напрямку вітру, тому

можуть ефективно працювати на практично будь-якій території. Лопаті цих пристроїв зазвичай мають довгу дугоподібну форму і розташовані концентрично навколо головного валу. Вертикальне розташування вала дозволяє приймати вітрові потоки з будь-якого напрямку, без необхідності зміни положення ротора. Це відрізняє їх від турбін з горизонтальним розташуванням, які вимагають точного вирівнювання з напрямком вітру. Мінімальна швидкість вітру для початку роботи знаходиться в діапазоні 1,0–1,5 м/с, і номінальний режим роботи встановлюється при 3–4 м/с.

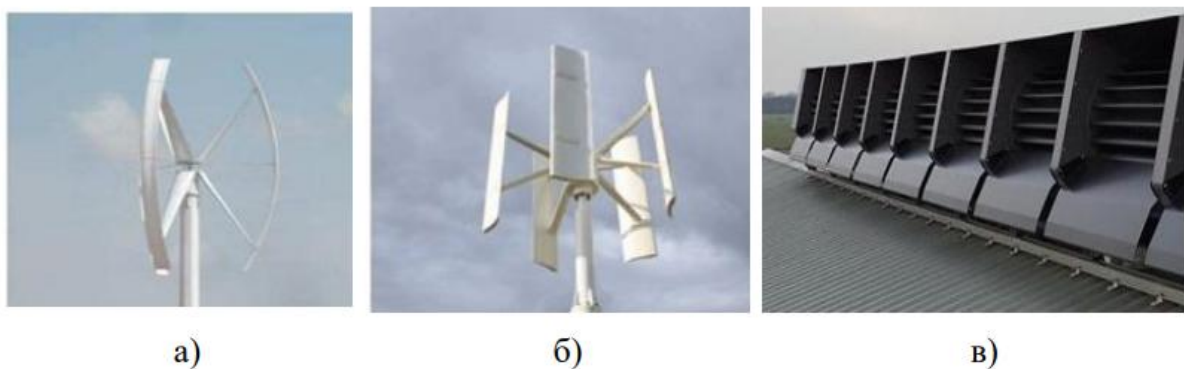


Рисунок 1.3 - Вітрогенератори: а, б) – вертикальні; в) гребеневі

Гребеневі горизонтальні вітрогенератори (див. рис. 1.3 в) представляють собою цікаве конструктивне рішення з точки зору ергономіки та функціональності. Основні переваги цих установок включають відсутність необхідності в будівництві щогли, оскільки турбіни розміщуються на дахах будівель поряд із сонячними панелями. Використання ефекту підйому повітряних потоків дозволяє отримувати величезну швидкість вітру на гребені в 2–3 рази вище, ніж початкова, за ламінарного режиму руху та залежно від кута нахилу даху. Також вони можуть сприймати бічний вітер та розташовуватися поруч одна з одною. Лопаті цих вітрогенераторів виготовлені зі скловолокна, надаючи конструкції гарне обтікання повітряним потоком і практично не створюючи шуму, що розв'язує проблему негативного впливу на здоров'я людей та тварин. Особливо важливо

відзначити, що вітрові електростанції несуть випадковий характер можливої шкоди для життя птахів, відмінно від традиційних теплових електростанцій (ТЕС), які часто викидають шкідливі речовини протягом всього терміну експлуатації, що негативно впливає на різноманіття живих організмів в радіусі дії забруднення.

Для аналізу можливостей підвищення енергетичної автономії підприємств АПК, взявши за основу Кіровоградську область, використаємо дані Українського гідрометеорологічного центру за 2018 рік [20] (див. рис. 1.4 та рис. 1.5). З рисунку 1.4 видно, що швидкість вітру протягом року перевищує 1,0-1,5 м/с, що відповідає мінімальним вимогам для вертикальних вітрогенераторів. Проте, генерація електроенергії в обсягах, близьких до номінальних, можлива лише протягом 10 місяців, оскільки в липні та серпні середня швидкість вітру складала відповідно 3,1 та 2,9 м/с.

З урахуванням параметрів вітрової активності (див. рис. 1.4) та для забезпечення стабільності графіка вироблення енергії, доцільно розглядати використання комбінованої системи електрозабезпечення. Ця система може включати модулі вітрових електростанцій та сонячних електростанцій, особливо у літні місяці, коли вітрогенератори можуть втратити частину своєї потужності. Сонячні модулі в цей період можуть компенсувати зниження потужності вітрогенератора. Крім того, в разі необхідності може бути розглянуто додаткове встановлення гребневих генераторів як додаткових джерел вироблення електроенергії та геліосистем для економії ресурсів при нагріванні води.

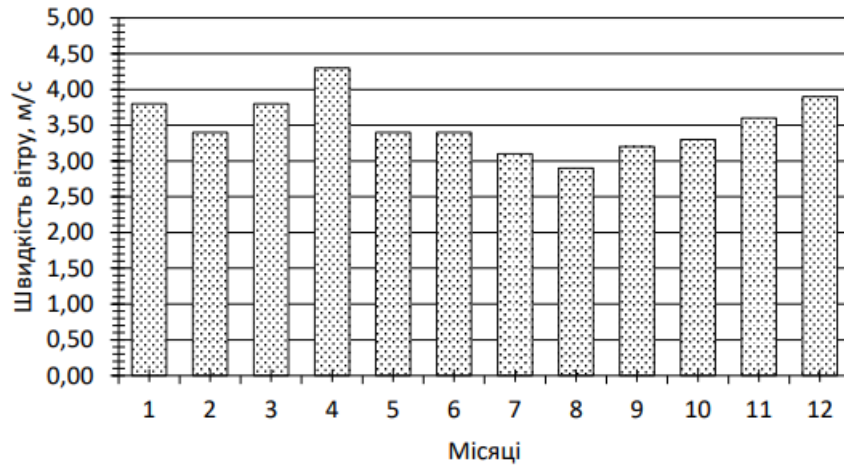


Рисунок 1.4 - Середні значення швидкості вітру по Кіровоградській області за рік.

Джерело: на основі даних [20]

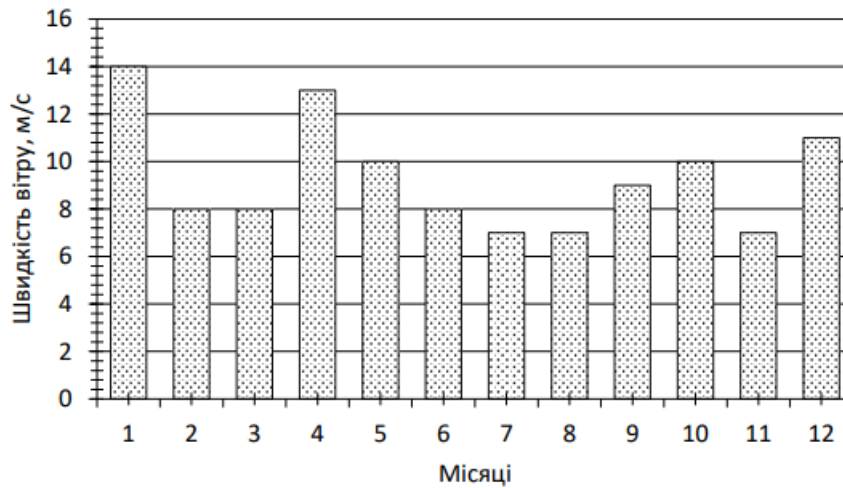


Рисунок 1.5 - Максимальні значення швидкості вітру по Кіровоградській області за рік.

Джерело: на основі даних [20]

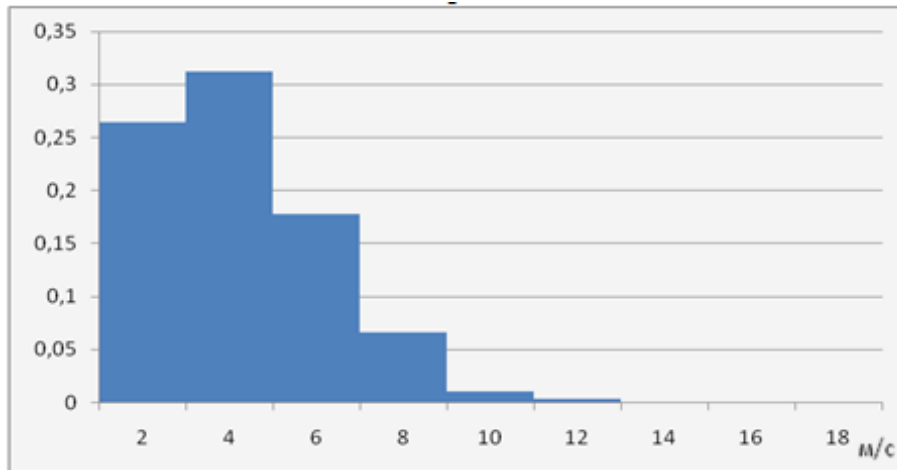


Рисунок 1.6 - Гістограма розподілу швидкостей вітру (за 5 років) для м. Кропивницький

Для ефективного управління коливаннями потужності, наприклад, при підвищеному вітровому навантаженні (див. рис. 1.5), необхідно використовувати системи зберігання енергії (див. рис. 1.7). Основними функціями цих систем є акумулювання надлишків енергії та віддача її у систему при потребі.

Технічні рішення щодо резервування енергії мають різну вартість, ємність та швидкодію. Вибір конкретної системи повинен здійснюватися з огляду на конкретні вимоги виробничих процесів підприємства, графік добового та річного споживання енергії, склад та параметри автономної енергетичної системи і інші фактори.

Для підприємств аграрного сектора, залежно від різних факторів, рекомендується використовувати різні пристрої для акумулювання електричної енергії, такі як:

- Супер-конденсатори - мають енергетичну ємність від 1 кВт·год. до 100 кВт·год. та час накопичення та віддачі енергії від 1 секунди до 5 хвилин.
- Супер-маховики - забезпечують енергетичну ємність від 1 кВт·год. до 100 кВт·год. та час накопичення та віддачі енергії від 1 хвилини до 1 години.

– Акумуляторні батареї різних типів -мають енергетичну ємність від 50 кВт·год. до 1 МВт·год. і більше, а також час накопичення та віддачі енергії від 10 хвилин до 1 доби.

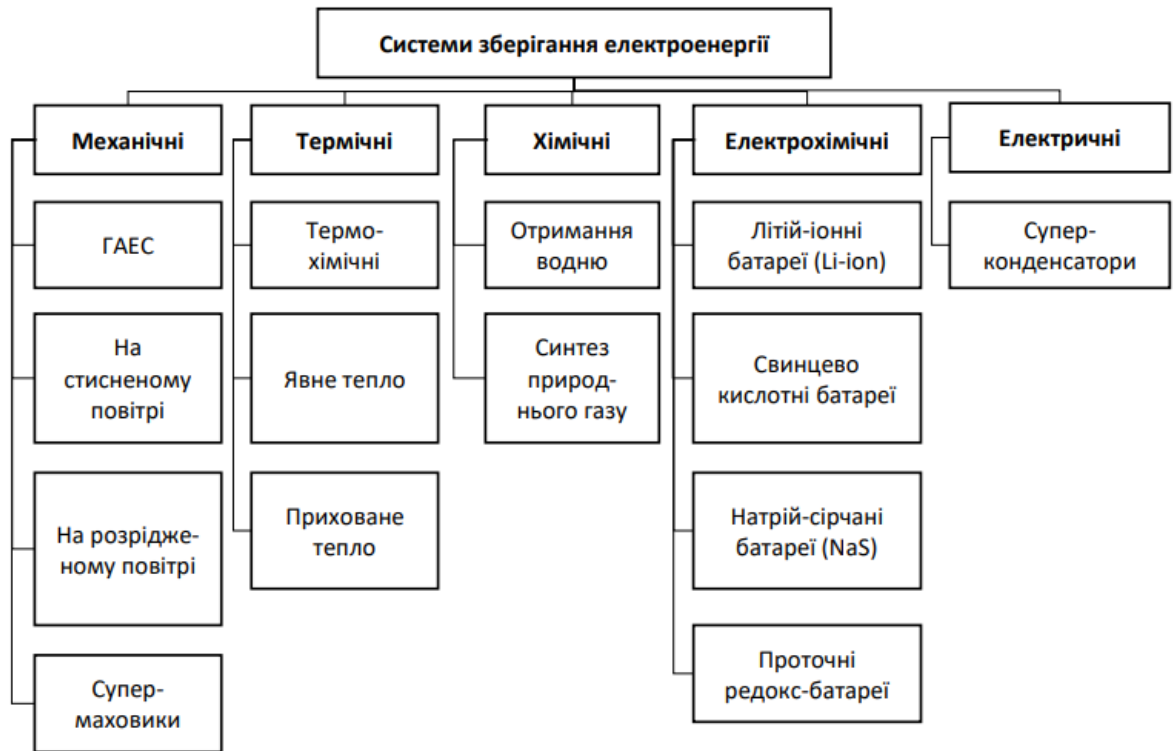


Рисунок 1.7 - Типи систем зберігання енергії.

Інші системи, спрямовані на акумулювання енергії в промислових масштабах, широко використовуються в США та країнах ЄС [15]. Для ефективного оперативного управління параметрами енергетичних мереж досить ефективними є накопичувачі енергії, засновані на літій-іонних батареях (ЛІА). Ці батареї відзначаються великою ємністю та здатністю швидко реагувати на коливання навантаження в автономній мережі (накопичення/віддача), що робить їх повністю здатними виконувати функції диспетчеризації роботи сонячних електростанцій (СЕС) та вітрових електростанцій (ВЕС).

2 ПОТЕНЦІАЛ СОНЯЧНОЇ ТА ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

2.1. Потенціал сонячної енергії.

Сонячна енергетика представляє собою одне з найбільш перспективних та динамічних джерел відновлюваної енергії. Умови для використання сонячної енергії в Україні є досить сприятливими. Середньорічна кількість сумарної сонячної радіації, що падає на 1 м² поверхні, коливається від 1070 кВт·год/м² на північному заході до 1400 кВт·год/м² і вище на південному заході. Основні кліматичні показники розподілені так: тривалість сонячного сяйва в середньому за рік коливається від 1690 – 1850 годин у західних районах Полісся та Лісостепу до 2150 – 2450 годин на узбережжях Чорного моря. Кількість сумарної радіації, тобто енергії, яка потенційно може бути використана для всіх природних процесів, розташована у межах від 1064,9 кВт·год/м² на рік на заході (Прикарпаття) до 1551,7 кВт·год/м² на півдні. Середні річні значення радіаційного балансу, тобто сонячної енергії, яка поглинається діяльним шаром земної поверхні, змінюються від 330 кВт·год/м² на Волині до 580 кВт·год/м² на узбережжях Чорного моря.

За даними [1] для обласних центрів України було розраховано середньорічні значення сумарної сонячної радіації та побудовано карту розподілу для території України. Розрахунок теоретичної встановленої потужності сонячної електростанції (СЕС) враховує не лише значення сонячної радіації, але і доступну площу для будівництва станцій, а також коефіцієнт потужності СЕС. Останній залежить від типу та розташування фотоелектричних панелей, відстані між рядами панелей та інших факторів. За результатами наукових досліджень теоретична встановлена потужність СЕС в Україні складає 82 768 МВт, а її річний потенціал електроенергії становить приблизно 100 млрд. кВт·год на рік.

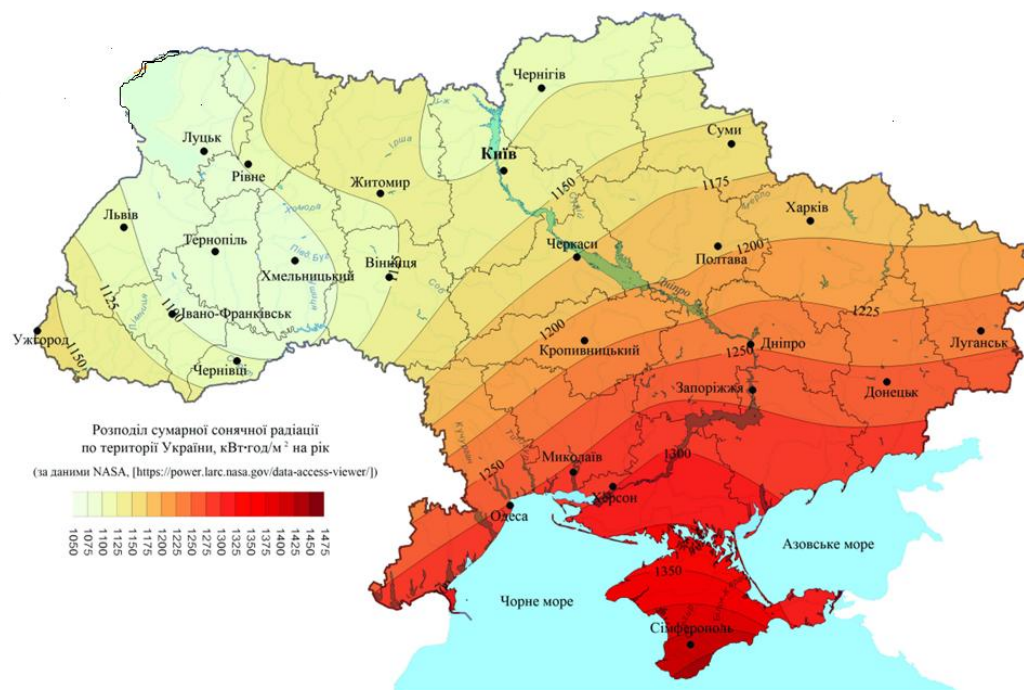


Рисунок 2.1 – Розподіл сумарної сонячної радіації по території України.

Джерело: Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України [3].

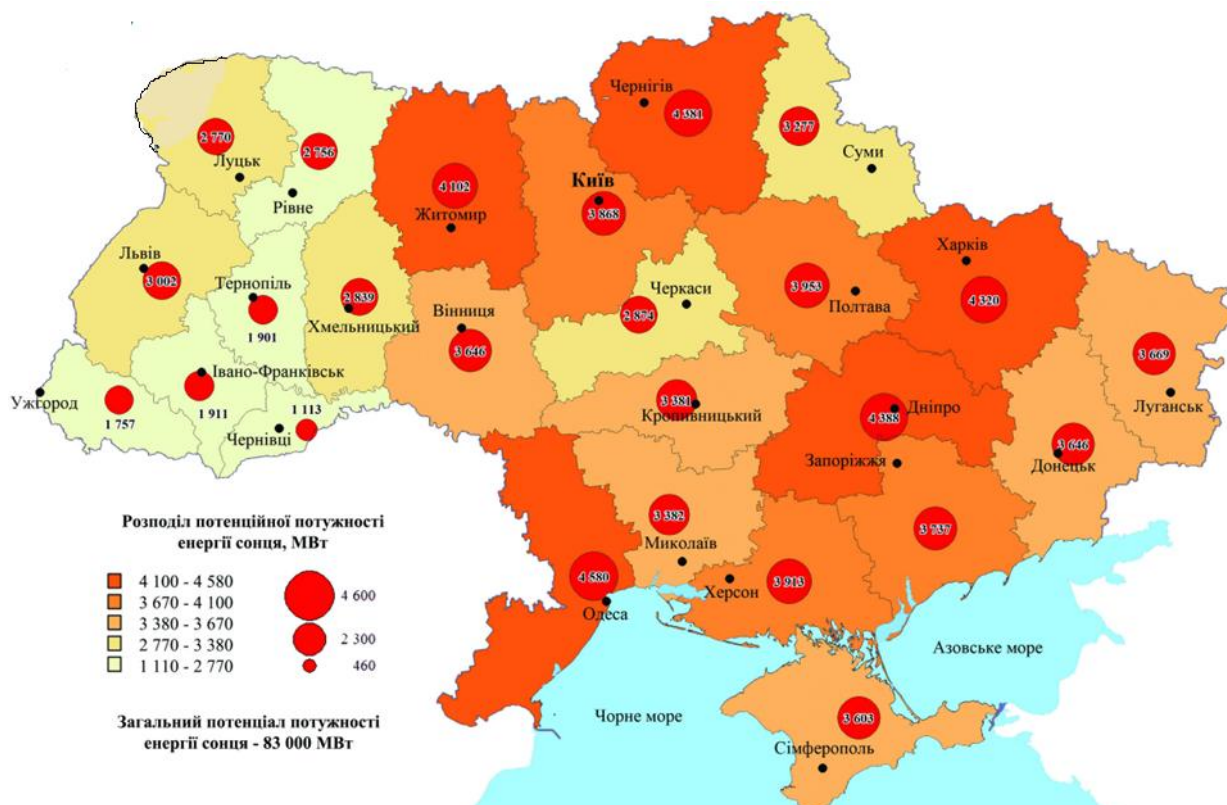


Рисунок 2.2 – Розподіл потенційної потужності енергії сонця.

Джерело: Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України [3].

В результаті аналізу статистичних метеорологічних даних щодо надходження сонячної радіації були визначені питомі енергетичні характеристики, пов'язані з отриманням сонячної енергії. Також проведено розподіл енергетичного потенціалу сонячного випромінювання для кожної області України.

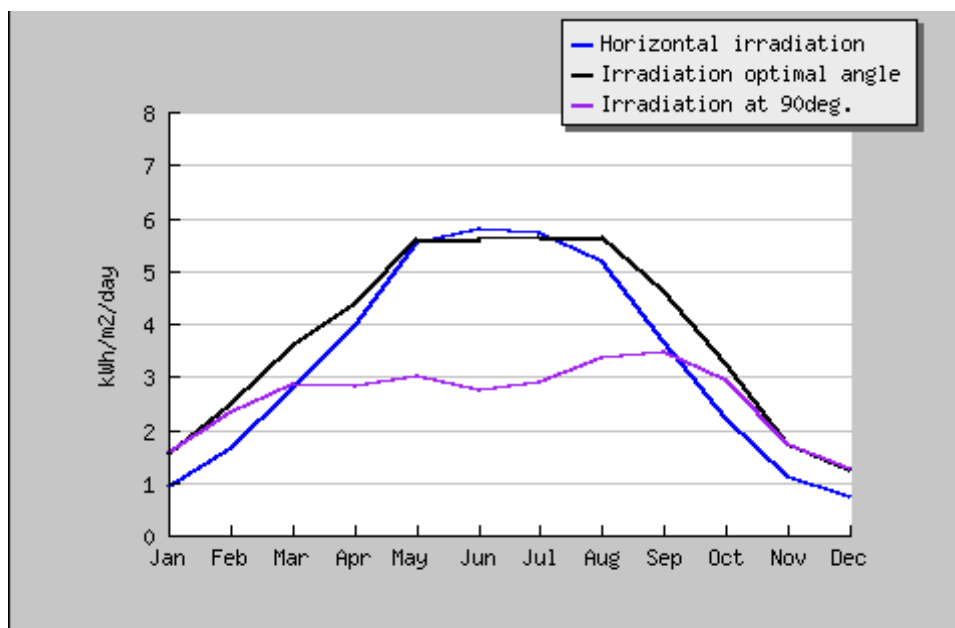


Рисунок 2.3 - Графік помісячної зміни опромінення приймаючої поверхні для Кіровоградської області.

2.2. Класифікація сонячних енергетичних установок та їх особливості.

Сонячна енергія виявляється надзвичайно універсальною в контексті можливостей її використання для задоволення різноманітних потреб людства. Сонячна енергія може бути досить легко перетворена на теплову, механічну, та електричну енергію. Крім того, її можна використовувати в хімічних та біологічних процесах. Системи сонячної енергії застосовуються в опалюванні і охолодженні різних типів будівель, включаючи житлові, суспільні та промислові споруди, а також знаходять застосування в

технологічних процесах, які відбуваються при різних температурах — від дуже низьких до ультрависоких [4].

Технологічні процеси перетворення та використання сонячної енергії можуть виявлятися дуже різноманітними з точки зору їхньої складності. Сонячні енергетичні установки (СЕУ) також можуть варіювати за розмірами: від невеликих джерел живлення для мікрокалькуляторів та ручних годинників до величезних технічних конструкцій у вигляді веж з сонячними батареями, що мають висоту до 100 метрів та вагу в сотні тонн. Залежно від технологічних схем, СЕУ можуть значно відрізнятися одна від одної — від простих плоских нагрівальних поверхонь до складних систем з автоматичним стеженням за сонцем для отримання максимального сонячного випромінювання на місці споживання [2].

Сонячні енергетичні установки використовуються в процесах сушіння різних матеріалів і сільгосппродуктів, по виробництву гарячої води, опрісненню морської води, отриманню прісної води і так далі. Сонячна енергія є необхідною для реалізації процесів фотосинтезу, росту та розвитку рослин. Завдяки сонячній енергії відбуваються різноманітні фотохімічні процеси на Землі [2].

Існує різноманіття технологічних схем для конвертації сонячної енергії (СВ) в електричну енергію, їх основу становлять відомі теплові цикли (такі як цикли Ренкіна або Карно), теплоелектричні та термoeмісійні процеси. В останні роки особливий прогрес досягають сонячні фотоелектричні системи, що базуються на великих досягненнях у сфері створення високоефективних фотоелектричних перетворювачів.

Враховуючи розсіяний характер сонячної енергії на Землі, розробляються різноманітні системи концентрації сонячних випромінювань з метою підвищення економічних і енергетичних показників сонячних енергетичних установок (СЕУ) різного призначення. Окрім чисто енергетичних вимог, СЕУ також повинні відповідати різноманітним вимогам,

що враховують особливості їх експлуатації. У зв'язку з вищезазначеним, особливо важливим стає завдання чіткої класифікації СЕУ з метою знаходження шляхів подальшого підвищення їх ефективності як на сьогодні, так і в майбутньому.

Розглянемо основні класифікаційні характеристики сучасних і перспективних типів сонячних енергетичних установок (СЕУ). Зокрема, можна виділити такі основні ознаки:

1. Вид перетворення і використання сонячної енергії (СВ):
 - У теплову, механічну, електричну енергію. СЕУ можуть перетворювати сонячну енергію на теплову, механічну або електричну енергію, а також використовуватися в хімічних і біологічних процесах.
2. За видом використання для певних споживачів енергії в електроенергетиці і теплоенергетиці:
 - СЕУ для великих об'єднаних енергосистем (ОЕС) або просто електроенергетичних систем (ЕЕС). СЕУ, розроблені для інтеграції великих енергетичних систем або електроенергетичних мереж.
 - СЕУ для роботи на локальних мережах. СЕУ, призначені для роботи на місцевих енергетичних мережах.
 - СЕУ для автономних споживачів. СЕУ, спроектовані для забезпечення енергією автономних споживачів із різним рівнем надійності енергопостачання.

Вимоги до інформаційного забезпечення геліоенергетичних розрахунків для системи енергопостачання, що включає сонячні енергетичні установки (СЕУ) або сонячні електростанції (СЕС), суттєво змінюються в залежності від цих факторів. Крім того, при використанні СЕУ для роботи на автономних споживачах, включаючи високий рівень надійності, може виникнути необхідність обов'язкового поєднання СЕУ з системою акумуляції енергії різних типів або з іншими видами енергетичних установок на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Наприклад, для систем

енергозабезпечення автономних споживачів, включаючи високий рівень надійності, може знадобитися не лише добовий, а часто і триваліший цикл акумуляції енергії. У великих системних сонячних електростанціях такі вимоги зазвичай відсутні, якщо не потрібно утримувати в робочому стані всю допоміжну інфраструктуру сонячної електростанції в періоди відсутності сонячної радіації та зв'язку з енергосистемою. Тут, крім стандартних систем акумуляції енергії, можуть використовуватися традиційні енергетичні установки на органічному паливі.

3. Залежно від місця розташування на Землі, сонячні енергетичні установки (СЕУ) можна поділити на наземні та космічні. Захист систем у них відрізняється: у космосі - захист фотоелектричних панелей (ПП) від інтенсивного космічного випромінювання, яке може пошкодити самі панелі; на Землі - вентиляція СЕУ, захист від пилу і вандалізму. Для космічних СЕУ, які операційно працюють у вакуумі і майже невагомості, проблема конструкції стає менш важливою, зосереджуючись в основному на вагових характеристиках фотоелектричних панелей. Однак передача накопиченої сонячної енергії на Землю стає важливою задачею, щоб уникнути шкоди людям і оточуючому середовищу. Наприклад, важливо забезпечити мінімальний вплив на озоновий захисний шар Землі. Для наземних СЕУ існують інші технічні виклики, такі як урахування циклічності сонячної радіації впродовж доби і сезонів року, що відсутні у космічних установках. Це може вимагати обов'язкового використання систем акумуляції енергії в залежності від категорії використання СЕУ.

4. За стаціонарністю і мобільністю СЕУ можна класифікувати на переносні, пересувні і стаціонарні. Ці види відрізняються як за масо-габаритними характеристиками, так і за складністю конструкції. Надійність також істотно різниться між ними.

5. За виглядом орієнтації на сонце СЕУ поділяються на два типи: з постійною (незмінною) орієнтацією на поверхні землі і з системою стеження

за Сонцем для максимізації приходу сонячної енергії на фотопанелі. Постійно-орієнтовані на Сонце СЕУ, як правило, використовуються в домашньому господарстві та розташовані на дахах будівель або на землі з орієнтацією на південь під постійним кутом до горизонту. У деяких випадках для менших систем можлива зміна кута нахилу фотопанелей впродовж року, що може бути реалізовано конструктивно. Система стеження за Сонцем може бути реалізована за допомогою зміни кута нахилу та горизонтального положення фотопанелей, а також шляхом обертання фотопанелей навколо їхньої вертикальної або горизонтальної осі для максимізації сонячного випромінювання.

6. За складністю технічного циклу і виконанням СЕУ поділяються на прості або складні з технічного погляду. До простих СЕУ відносяться, наприклад, нагрівачі води різної конструкції, підігрівачі повітря, сушарки для продуктів сільського господарства, опалювальні системи, опріснювачі води, теплиці, сонячні кухонні печі або нагрівачі, холодильні та водопідіймальні установки і так далі. Виготовлення таких простих СЕУ, спрямованих на побутове використання, вважається непоганою задачею, і їх можна легко виготовити навіть в домашніх умовах.

2.3. Потенціал енергії вітру.

Україна має значний потенціал вітрової енергії, і його розподіл по території є нерівномірним, залежачи від кількох факторів. Серед них важливі:

- Розподіл швидкості та напрямку вітру біля земної поверхні. Різниці в цих параметрах визначають ефективність використання вітрової енергії на різних територіях.
- Вертикальний профіль вітру (параметр α). Цей профіль залежить від типу підстильної поверхні. Відмінності в цьому параметрі впливають на ефективність використання вітру на різних висотах.

– Рельєф підстильної поверхні та відстані до великих водойм. Географічні особливості, такі як гірські масиви чи наявність великих водойм, впливають на швидкість та напрямок вітру, що в свою чергу визначає потенціал вітрової енергії в конкретній області.

Аналіз довготривалої динаміки середньорічної швидкості вітру на 40 метеорологічних станціях, де дані спостережень були визнані валідними, вказує на зміну середньорічної швидкості вітру на території України у межах від 2,5 м/с до 5,7 м/с на висоті флюгера (приблизно 10 метрів). Найвищі швидкості вітру спостерігаються на Приазовській височині, Причорноморській низовині, у Карпатах, Волинській та Донецькій височині.

Характерним є те, що західні вітри переважають у західних, центральних та північних областях, тоді як східні та північні вітри є переважаючими для східних та південних областей.

Параметр моделі вертикального профілю вітру (α) було розраховано на основі даних реаналізу [6] для висот 10 та 50 метрів. Зазначений параметр змінюється в межах від 0,09 до 0,29. Розрахований коефіцієнт використання номінальної потужності (КВНП) для сучасних моделей вітрових електроустановок (ВЕУ) коливається від 0,21 до 0,53.

Для оцінки технічно-досяжного вітропотенціалу (ТДВП) територій України пропонується використовувати географічний підхід. Цей метод є значно простішим і вимагає менше витрат часу і коштів, ніж метод, викладений у [2, 3]. Територія суходолу України природними умовами поділяється на чотири природні зони (див. рис. 2.4), кожна з яких має свої однорідні географічні умови.

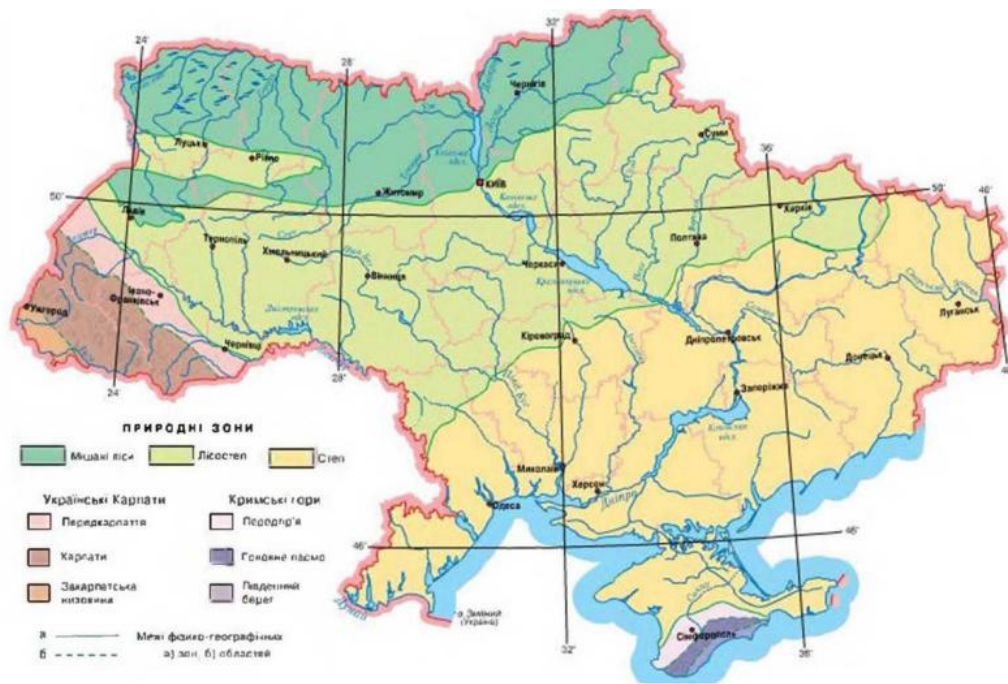


Рисунок 2.4 – Карта природних зон України

Джерело: Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України [3].

Будівництво вітрових електростанцій (ВЕС) у гірських районах є особливо викликливим завданням. Цей процес вимагає значних витрат часу та коштів на вибір майданчиків для ВЕС, трасування шляхів і ліній електропередачі, доставку вітрогенераторів і кранів, а також обслуговування. Додатково, будівництво у гірських умовах може зустрічати складнощі через труднощі доступу та нерівномірний рельєф.

Лісова зона також визначається як менш приваблива для розміщення ВЕС з кількох причин. Ліси природним чином стають перешкодою для вітрових потоків. Навіть якщо висота дерев значно нижча за нижній край вітрогенератора ВЕС, вони сприяють турбулентності вітрового потоку, що призводить до зменшення виробітку електроенергії та прискореного зносу ВЕС.

Територія, що залишається в зоні лісостепу після вилучення лісових ділянок та антропогенних перешкод, виявляється досить придатною для

реалізації економічно ефективних інвестиційних проектів у сфері вітроенергетики.

Особливо привабливою для реалізації таких проектів є степова зона. Високі вітри в холодний період року, які зменшуються в теплу пору, компенсуються додатковими локальними вітрами, такими як бризи. Наявність потужних морських портів і розвинена мережа автошляхів у степовій зоні сприяють вирішенню проблем логістики в реалізації проектів вітроенергетики.

Результати аналізу потенціалу вітроенергетики в Україні свідчать, що найбільший потенціал встановлення потужності та виробітку електроенергії від вітрових електростанцій (ВЕС) спостерігається в Дніпропетровській, Херсонській, Одеській та Запорізькій областях.

З урахуванням зазначеного потенціалу географічних областей суходолу України можливе введення в експлуатацію 438 ГВт економічно ефективних ВЕС на основі сучасних моделей вітроенергетичних установок трьохмегаватного класу. Разом із потенціалом офшорних ВЕС це складає $438 + 250 = 688$ ГВт з середньозваженою нижньою границею коефіцієнта використання номінальної потужності (КВНП) на рівні 0,36.

При цьому річний обсяг виробітку електроенергії досягає практично 2 200 млрд кВт·год, що вдесятеро перевищує сучасні річні обсяги споживання електроенергії в Україні.

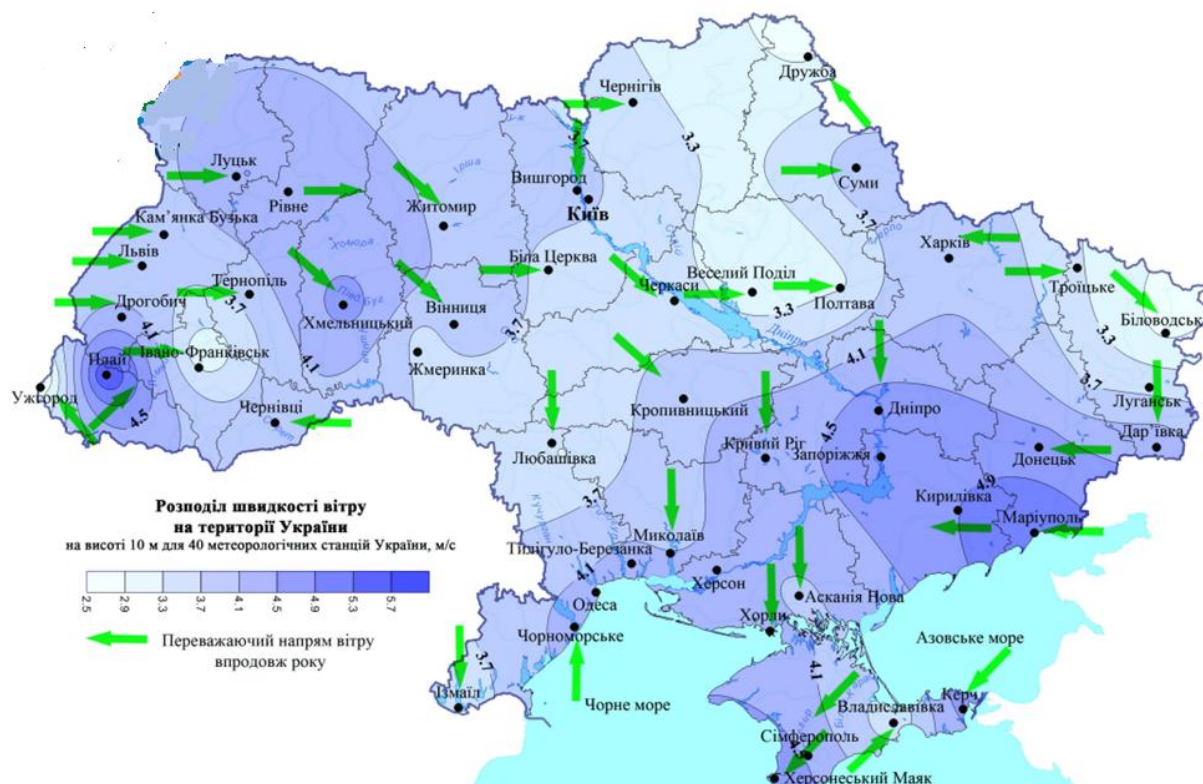


Рисунок 2.5 – Розподіл швидкості вітру по території України.

Джерело: Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України [3].

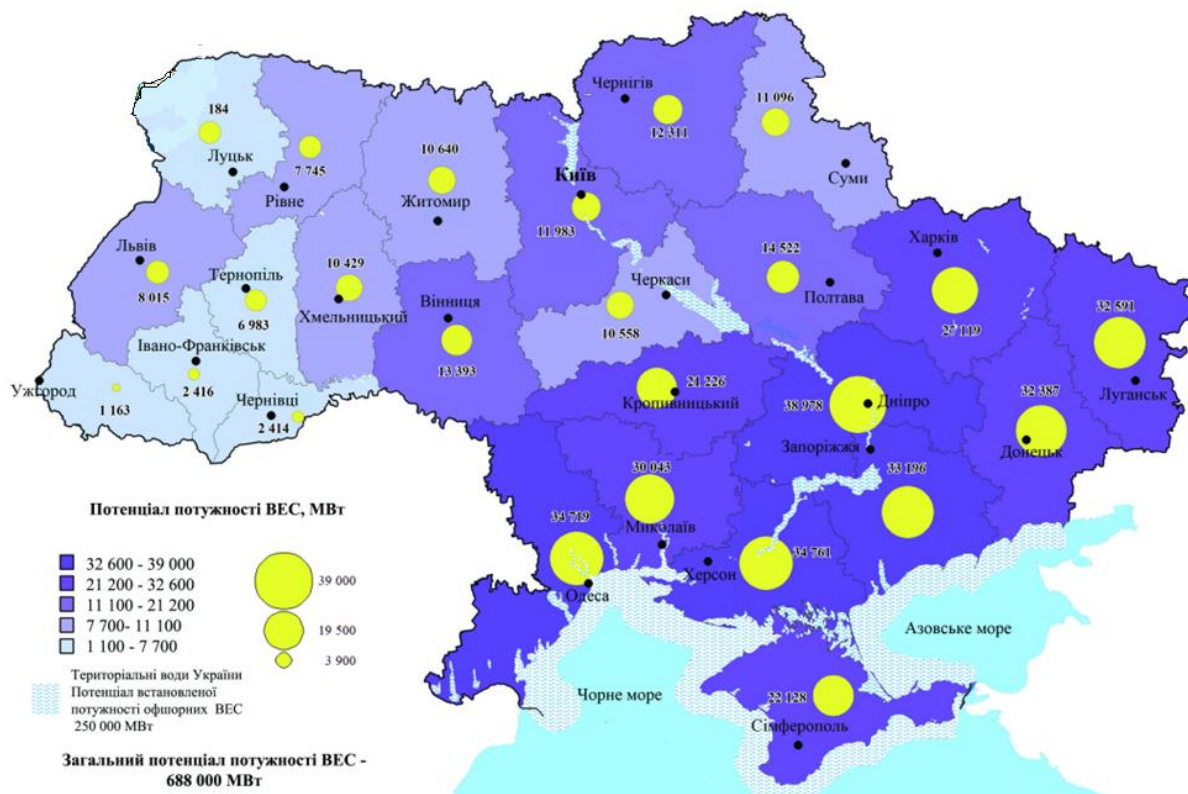


Рисунок 2.6 – Потенціал потужності ВЕС.

Джерело: Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України [3].

2.4. Вітроенергетичні установки.

Сучасне промислове виробництво вітрових електростанцій (ВЕС) включає більше 300 компаній, які займаються розробкою та виробництвом ВЕС різних конструкцій. Для оцінки ефективності їхнього використання в різних умовах використовують класифікації, які розвивалися протягом історії вітроенергетики.

Однією з основних основ класифікації ВЕС є розташування і конструкція вітрового колеса (ВК), а також форма і конструкція його лопатей. Зазвичай конструкції ВК поділяються на два класи відносно осі обертання:

- З вертикальною віссю обертання, такі як типи Дар'є, Савоніуса або їх комбінації.
- З горизонтальною віссю обертання, що можуть бути різними за кількістю лопатей, наприклад, пропелерного типу або щільно заповнені ВК.

Найпоширеніші сучасні ВЕС мають горизонтальну вісь обертання вітрового колеса.

Вітрогенератори з горизонтальною віссю обертання, такі як швидкохідні та тихохідні, додатково класифікуються за швидкістю обертання вітрового колеса. Вони поділяються на дві основні категорії:

1. Швидкохідні ВЕУ:

- Кутова швидкість обертання ВК перевищує 120 обертів на хвилину.
- Кількість лопатей може бути від 1 до 3.
- Відхилення перерізу лопаті в робочому стані становить приблизно 3–5°.

2. Тихохідні ВЕУ:

- Кутова швидкість обертання ВК знаходиться в межах 30–40 обертів на хвилину.

Ця класифікація дозволяє враховувати особливості швидкості обертання та конструкції вітрового колеса, що може бути важливим при виборі технології для конкретних умов та завдань.

Тихохідні вітряки характеризуються щільною компоновкою лопатей (від 18 до 22 лопатей і більше) та кутом відхилення перерізу лопаті в робочому стані, який становить $18\text{--}22^\circ$ від фронтальної площини. Швидкохідні вітряки, з свого боку, мають перевагу в високій швидкості обертання, що призводить до спрощення трансмісійних зв'язків між вітроколом та генератором електричного струму. Це забезпечує достатньо високу якість електроенергії без ускладнення перетворюючих електричних схем.

Завдяки тому, що форма лопаті вітрокола нагадує крило, ККД такого вітрокола істотно зростає завдяки ефективному впливу аеродинамічних сил, що виникають при обтіканні потоком повітря. Однак у випадку виготовлення швидкохідних вітроколів жорсткі вимоги висуваються до форми поперечного перерізу лопаті. Також для швидкохідних вітроколів не можливий самозапуск, тому необхідно використовувати додаткові механізми для обертання та орієнтації, або забезпечувати їх додатковим джерелом енергії для запуску. При великих швидкостях обертання вітроколів виникає дисбаланс його елементів, що створює значні динамічні напруги в опорах. Тому проблема балансування таких колів є досить актуальною, особливо при великих розмірах вітроколів. При великих кутових швидкостях повністю виявляються гіроскопічні ефекти, які накладають додаткові обмеження на конструкцію та умови роботи механізмів обертання та орієнтації вітрокола.

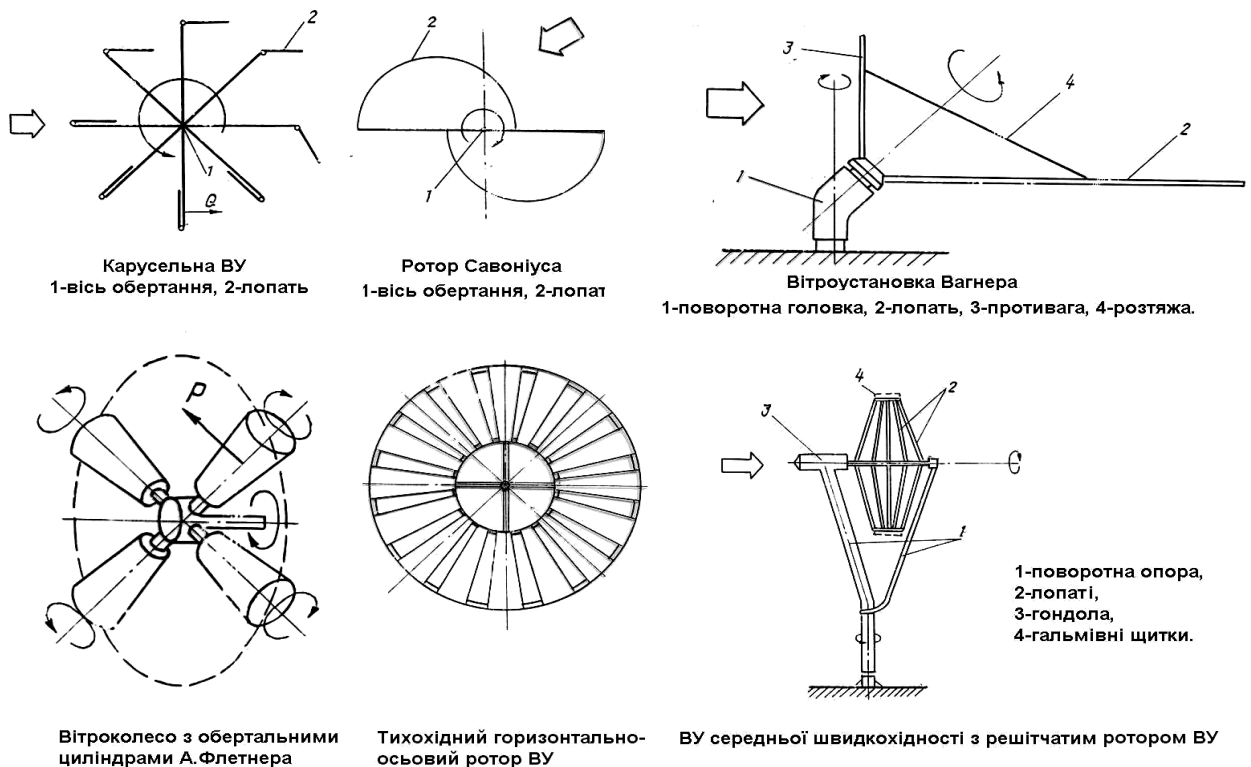
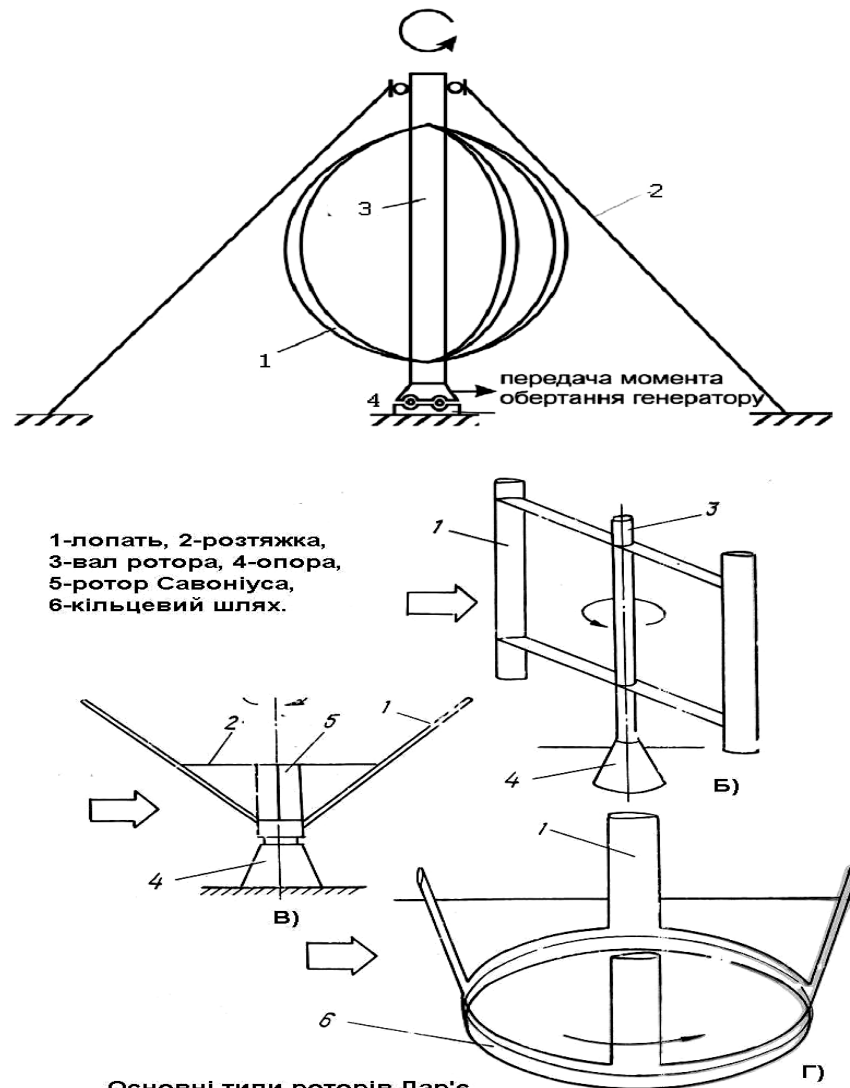


Рисунок 2.7 - Вітрогенератори з горизонтальною віссю обертання

Сучасні вітроенергетичні системи, відомі як вітряки, розділяються на дві категорії: мережеві, які мають велику потужність, в сотні тисяч кіловат, і працюють у співпраці з електромережею для забезпечення споживачів енергією при відсутності вітру, та автономні, що взаємодіють з акумулятором. Зазвичай потужність автономних вітряків не перевищує 5-10 кВт, і їх часто називають вітроелектричними установками малої потужності (ВЕУМП). Малі вітроенергетичні установки вирізняються простотою та доступністю у монтажі, експлуатації та ремонті. Вони є екологічно чистими та майже не потребують обслуговування, регулярної настройки та інших технічних втручань. Використання генератора без редуктора в парі з вітродвигуном ще більше спрощує та здешевлює конструкцію вітряків, підвищуючи їх надійність.



Основні типи роторів Дар'є
 А)- з зігнутими лопатями, Б)- з прямими лопатями,
 В)- з наклоненими лопатями, Г)- з кільцевим шляхом.

Рисунок 2.8 - Вітрогенератори з вертикальною віссю обертання з використанням сили опору і підйомної сили

Ні один з класів нетрадиційних енергетичних установок не об'єднує в собі такий комплекс важливих характеристик. Зазначено, що ці установки можуть надавати енергопостачання в регіонах з середньою швидкістю вітру лише 3-5 м/с. Вітроколесо з п'ятьма лопатями діаметром 3,3 м вбудовується на збірну щоглу з труб і сталевими розтяжками. Для монтажу щогли потрібний фундамент і спеціальні пристосування. Також використовується захист від сильних вітрів.

Генератор, розташований на поворотному підшипнику, має асиметричну конструкцію. Під впливом збільшеного вітрового тиску корпус генератора починає обертатися, розгортаючи вітрове колесо горизонтально. Коли сила вітру зменшується, пружина флюгера повертає колесо у попереднє положення. Вітряк обладнаний флюгерною системою, яка постійно орієнтує вітроколесо на вітер і одночасно захищає пристрій від надмірного вітрового тиску. Як і будь-який звичайний вітряк, флюгер у горизонтальній площині може обертатися в обидві сторони на декілька обертів під дією вітру. При припиненні вітру спеціальна пружина повертає його у початкове положення, уникаючи закручування кабелю, яким передається енергія. Крім того, генератор разом із вітровим колесом може обертатися і у вертикальній площині.

У випадку, коли сила вітру стає надто великою і існує загроза пошкодження установки, вітрове колесо разом із генератором повертається навколо горизонтальної осі. Це оптимізує вплив вітрового тиску, здійснюючи поворот до кута 90 градусів, при якому лопаті розташовані паралельно напрямку повітряного потоку.

Перехід до енергетичної сфери середньої потужності можна легко здійснити шляхом створення енергетичних комплексів (ЕК), які включають в себе декілька вітрових установок (від 5 до 10 одиниць). Об'єднання потужностей здійснюється за допомогою єдиного акумулятора. Хоча розташувати такий комплекс на невеликій площі, наприклад, на шести дачних сотках, неможливо, але його площа залишається невеликою. Номінальна потужність ЕК може досягати 10-15 кВт, пікова потужність - 20-25 кВт, а вироблення енергії - до 1800 кВт•год в місяць. Одночасно вартість виробництва зменшується в 3-4 рази.

Характеристику дії вітрів різної сили на вітроенергетичну установку зведено в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 - Сила вітру відповідно шкалі Ботфорта та її вплив на роботу ВЕУ.

Бал	Швидкості вітру, (м/с)	Потужність сили вітру	Ефекти спостереження	Вплив вітру на вітрову установку	Умови роботи вітрової установки
1	2	3	4	5	6
1	0,40-1,80	Тиха	Вітер трохи відхиляє флюгер, на воді маленькі брижі	-	Немає
2	1,80-3,60	Легка	Вітер відчувається обличчям, гойдає листя дерев, на воді невеликі хвилі	-	Немає
3	3,60-5,80	Слабка	Вітер розвиває легкі прапори, відхиляє флюгер, розгойдує тонкі гілки дерев	Починається обертання лопатей тихохідних ВЕУ	Несприятливі для усіх установок
4	5,80-8,50	Помірна	Починають гойдатися гілки листяних дерев, хвилі на воді вкриваються легкою піною	Починається обертання колес всіх ВЕУ	Задовільні
5	8,50-11,0	Свіжа	Гойдаються великі гілки дерев, телефонні проводи	Потужність ВЕУ сягає 30% проектної	Дуже хороші
6	11,0-14,0	Сильна	Всі дерева розгойдуються, з хвиль зривається піна	Потужність розрахункового діапазону близька до максимальної	Сприятливі для потужних малогабаритних установок
7	14,0-17,0	Міцна	Утруднено йти проти вітру зламуються тонкі гілки дерев	Максимальна потужність	Крайні припустимі
8	17,0-21,0	Дуже міцна	Дуже важко пересуватися проти вітру, ламаються тонкі дерева.	Починається відключення	Неприпустимі
При швидкості вітру 21,0-34,0 м/с - шторм, понад 34,0 м/с – ураган.					

На основі наведених даних можна побудувати графік ефективності роботи вітрових та сонячних установок у залежності від конкретного місяця року для Кіровоградської області. Цей графік представлено на рис. 2.9.

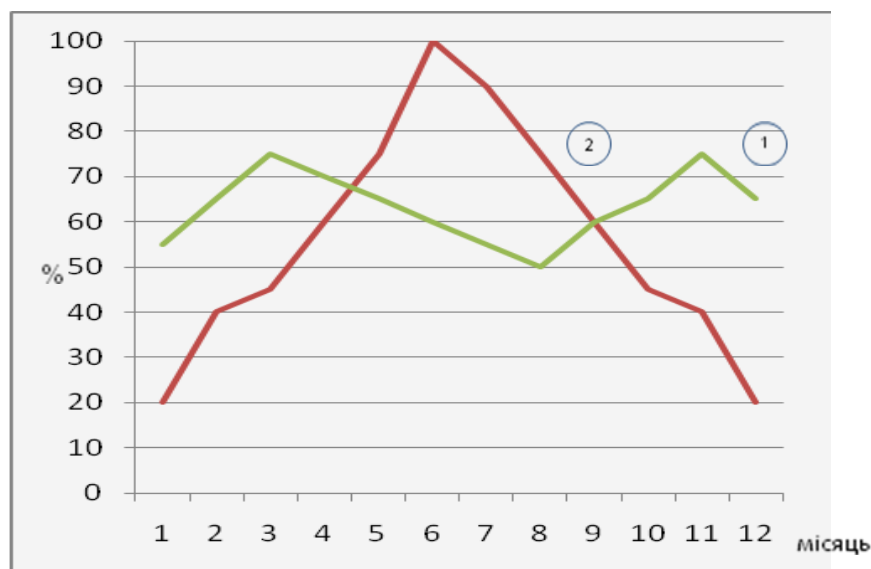


Рисунок 2.9 - Ефективність роботи вітрових та сонячних установок відповідно місяцям року для Кіровоградської області. (1 —ефективність вітрогенератора, 2 —ефективність сонячної установки)

Згідно з проведеними дослідженнями, можна визначити, що проблема виробництва електроенергії в Україні переросла в економічну проблему розвитку країни, що призводить до значних валютних витрат на їхній імпорт.

За світовою практикою можна визначити, що існують ефективні альтернативні методи виробництва електроенергії на основі нетрадиційних відновлюваних джерел, зокрема енергії вітру та сонця.

У відмінну від більшості країн Західної Європи та Америки, де потоки повітря мають середню швидкість 10–14 м/с, в Україні найпоширенішими є вітри зі швидкостями до 5 м/с (70–80%). Ці та інші фактори, розглянуті у роботі, дозволяють зробити висновок, що саме сонячні та тихохідні вітроенергетичні установки малої та надмалої потужності є перспективними для використання автономними споживачами, такими як фермерські господарства, як з техніко-економічної, так і екологічної точок зору.

3 ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІТРОВОЇ ТА СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ І МЕТОДИ ЇХ ОЦІНКИ

3.1. Принцип дії і класифікація ВЕУ.

Як вже зазначалося, в електростанціях, які використовують вітроенергію, енергію вітру перетворюють у механічну енергію робочих органів. Основним елементом є вітроколесо, яке безпосередньо отримує енергію вітру і перетворює її в кінетичну енергію обертання. Рух вітроколеса під впливом вітру викликаний тим, що на будь-яке тіло, яке знаходиться в потоці газу, діє сила P , що розкладається на дві складові: - уздовж напрямку потоку (сила лобового опору F_o) та в напрямку, перпендикулярному напрямку потоку, за допомогою піднімальної сили F_p . Величини цих сил залежать від форми тіла, його орієнтації в потоці газу та швидкості. Під впливом цих сил вітроколесо розпочинає обертатися.

Вітроустановки класифікують за двома основними ознаками: геометрією вітроколеса та його положенням щодо напрямку вітру. Якщо ось обертання вітроколеса паралельна напрямку повітряного потоку, то така установка вважається горизонтально-осьовою, якщо ж перпендикулярна - вертикально-осьовою.

Установки, які використовують силу лобового опору, зазвичай обертаються з лінійною швидкістю, меншою, ніж швидкість вітру. Тоді як установки, які використовують підняття сили, мають лінійну швидкість кінців лопаток, що перевищує швидкість вітру.

Кожне вітроколесо характеризується:

- Площею що обмітається S , що представляє собою площу, яку охоплюють його лопаті під час обертання, і обчислюється за формулою $S = \pi D^2/4$, де D - діаметр вітроколеса.
- Геометричним заповненням, яке визначається відношенням площі проекції лопат на площину, перпендикулярну потоку, до площі що обмітається. Наприклад, при однакових лопатях чотирилопатне колесо

матиме вдвічі більше заповнення, ніж дволопатне. Це характеризується коефіцієнтом потужності C_s , який вказує на ефективність використання енергії вітрового потоку та залежить від конструкції вітроколеса.

– Коефіцієнтом швидкохідності Z , який визначається відношенням швидкості кінця лопаті до швидкості вітру.

При швидкості вітру U та щільності повітря ρ вітроколесо з площею що обмітається S розвиває потужність P , яка пропорційна кубу швидкості вітру, тобто $P = \frac{3}{2} \rho C_s U^3$. Вітроенергетичні установки (ВЕУ) з великим геометричним заповненням вітроколеса виробляють значну потужність при низькій швидкості вітру, а максимум досягається при невеликих обертах колеса. З іншого боку, ВЕУ з малим заповненням досягають пікової потужності при великих обертах, але потребують більше часу для входження в цей режим. Таким чином, перші застосовуються в водяних насосах і залишаються працездатними навіть при слабкому вітрі, тоді як другі використовуються як електрогенератори, де необхідна висока частота обертання.

3.2. Швидкість та силові властивості вітру.

Кінетична енергія повітря з масою m , що рухається із швидкістю V обчислюється по формулі:

$$W_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2, \text{ Дж.} \quad (3.1)$$

Потужність повітря, яке рухається потоком кінетичної енергії за секунду:

$$P = \frac{1}{2} \cdot (m_n \cdot t) \cdot V^2 \quad (3.2)$$

Приймаємо: P – механічна потужність повітря, яке рухається

V – швидкість повітря, м/с

A – простір, який обмітається крилами турбіни, м^2

ρ – густина повітря, кг/м^3

m_n – маса повітряного потоку, кг

t – період протікання, с

таким чином, об'ємна норма потоку повітря становить $A \cdot V$, масова норма потоку повітря в кг/с становить $\rho \cdot A \cdot V$, і потужність, яку отримуємо:

$$P = \frac{1}{2}(\rho A V^3) \text{ Вт} \quad (3.3)$$

Дві потенційні вітрові установки порівняні за умов специфічної потужності вітру, яка виражена у Вт/м² простору, обмітаючись крилами турбін:

$$P_i = \frac{1}{2} \rho \cdot V^3 \text{ Вт/м}^2 \quad (3.4)$$

де P_i – потужність однієї установки, Вт

3.3. Розподіл швидкості вітру.

З урахуванням кубічного зв'язку з потужністю, швидкість вітру стає найбільш важливою величиною для оцінки потенціалу потужності вітроенергетичної установки. Важливо враховувати, що вітер не є постійним у жодній місцевості. Його вплив визначається типом місцевої погоди, ландшафтом та висотою над рівнем моря. Швидкість вітру може змінюватися щохвилино, погодинно, поденно та залежить від сезону та року.

З цього випливає, що статистичні виміри потрібно проводити протягом періоду тривалістю понад 10 років. Такий тривалий період вимірів сприяє підвищенню точності отриманих даних щодо енергетичного потенціалу місцевості. Втім, довготривалі виміри можуть бути витратними, і багато проєктів не можуть чекати такого тривалого періоду.

У випадку обмеженого часу, наприклад, протягом одного року, інформацію можна порівнювати з даними з найближчої місцевості, яка має довготривалу базу вимірів. Це дозволяє передбачити зміни швидкості вітру на будівельному майданчику.

Так, відомий підхід «вимірювання, кореляція, та передбачення (ВКП)» є ефективним для оцінки потенціалу вітроенергії в конкретній місцевості. З урахуванням того, що швидкість вітру змінюється відповідно до пори року та активності сонця, графік швидкості вітру може періодично повторюватися щорічно.

Вимірювання середньомісячної швидкості вітру є поширеним методом визначення вітрового режиму на місцевості. Об'єднання місячних графіків може бути використано для отримання річних графіків і порівняння "вітряності" різних місць.

Зміни швидкості вітру можна виразити функцією розподілу ймовірностей, що дозволяє більш детально вивчити ймовірність різних значень швидкості вітру протягом визначеного періоду. Це важливо для ефективного планування та оптимізації вітроенергетичних проєктів.

3.4. Графік розподілу ймовірностей Вейбула.

Варіації швидкості вітру краще виразити через функцію розподілу ймовірностей Вейбула h з двома параметрами - параметром форми k , та параметром величини c . Ймовірність досягнення величини v швидкості вітру протягом будь-якого часового інтервалу виражена у наступному рівнянні:

$$h(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad \text{для } 0 < v < \infty \quad (3.5)$$

У діаграмі розподілу ймовірності, h порівнюється із v в обраному часовому інтервалі, де:

$$h = \frac{t(v + \Delta v)}{\Delta v} \quad (3.6)$$

З визначення ймовірнісної функції видно, що ймовірність того, що швидкість вітру буде у проміжку від нуля до нескінченності, протягом періоду, до якого вона досягне одиниці, є одиницею:

$$\int_0^{\infty} h \cdot dv = 1 \quad (3.7)$$

Якщо ми оберемо часовий інтервал, що дорівнює одному року, то ми зможемо представити ймовірнісну функцію як число годин у році, наприклад:

$$h = \frac{T^{\text{річ}}(v+\Delta v)}{\Delta v}, \quad (3.8)$$

Таким чином одиницею виміру 'h' стануть години на рік на метр за секунду, і інтеграл (3.7) буде дорівнювати 8,760 (кількість годин у році), а не одиниця.

Підводячи підсумок щодо характеристики функції розподілу ймовірності Вейбула отримаємо:

k=1 утворює експоненційний характер функції, $h=\lambda \cdot e^{-\lambda v}$ де $\lambda=1/c$,

k=2 перетворює у функцію Райлі, $h=2\lambda^2 \cdot v \cdot e^{-(\lambda v)^2}$,

k=3 утворює функцію нормальної «дзвоно-подібної» форми.

3.5. Характеристика середньої швидкості вітру.

Розглянемо наступні характеристики швидкості вітру:

- **Мода швидкості.** Визначається як швидкість, при якій графік функції розподілу стає випуклим. Іншими словами, це та швидкість, при якій вітер дме протягом більшої частини часу.

- **Середня швидкість за період.** Розраховується як загальна площа під кривою $h-v$, інтегрованої від $v=0$ до ∞ , поділена на загальну кількість годин у періоді (наприклад, 8,760 годин для річного періоду). Річну середню швидкість можна потім порівняти з середньою швидкістю, як зазначено нижче:

$$V_{\text{середня}} = \frac{1}{8760} \int_0^{\infty} h \cdot v \cdot dv \quad (3.9)$$

Для c і k що змінюються у діапазоні відповідності місцям установки, інтегральний вираз може апроксимуватися до Гамма функції:

$$V_{\text{середня}} = c \sqrt{1 + \frac{1}{k}} \quad (3.10)$$

де c – параметричний коефіцієнт Райлі.

Для розподілу Райлі із $k=2$, Гамма функція може апроксимуватися в наступне рівняння:

$$V_{\text{середня}} = 0,9 \cdot c \quad (3.11)$$

Існує дуже простий зв'язок між параметром величини c і v , який можна використовувати з достатньою точністю. Наприклад, більшість установок оцінюються за параметрами середньої швидкості вітру.

Параметр c відповідно із розподілом Райлі $c = V_{\text{середня}} / 0,9$. Параметр k зазвичай дорівнює 2,0 для розподілу Райлі. Звідси маємо розподіл Райлі у вигляді основної відповідності до середньої швидкості:

$$h(v) = \frac{2v}{c^2} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} = \frac{2v}{(V_{\text{середня}})^2} \cdot e^{-\left(\frac{v}{V_{\text{середня}}}\right)^2} \quad (3.12)$$

3.6. Корінь середньої кубічної швидкості.

Потужність вітру пропорційна кубу швидкості, і енергія, що зібрана протягом року, визначається через інтеграл $h \cdot v^3 \cdot dv$. Корінь кубічний середнього значення швидкості вітру використовується для цього обчислення:

$$h(v) = \sqrt[3]{\frac{1}{8760} \int_0^\infty h \cdot v^3 \cdot dv} \quad (3.13)$$

Корінь кубічний середнього значення швидкості вітру корисний для швидкого розрахунку річного енергетичного потенціалу місця установки. Використовуючи $V_{\text{ккз}}$ для визначення середньорічної потужності:

Користь використання кореня кубічного середнього значення швидкості вітру полягає в швидкому розрахунку річного енергетичного

потенціалу місця встановлення. Показник $V_{\text{ККСЗ}}$ використовується для визначення середньорічної потужності

$$P_{\text{ККСЗ}} = \frac{1}{4} \rho \cdot V_{\text{ККСЗ}}^3 \text{ Вт/м}^2 \quad (3.14)$$

3.7 Функція розподілу енергії.

Виразити функцію розподілу енергії як:

$$h = \frac{W_{(v+\Delta v)}}{\Delta v} \quad (3.15)$$

Крива швидкості вітру вказує на наявність моди на рівні 5,5 м/с та середнього значення 6,35 м/с. Проте через кубічний зв'язок між швидкістю, максимальне енергопостачання розпочинається при швидкості вітру, рівній 9,45 м/с. Вище цієї швидкості, хоча V^3 продовжує зростати кубічно, кількість годин, протягом яких ця швидкість виявляється, збільшується на значення більше, ніж сама швидкість. Це призводить до повного зменшення річної виробітки енергії. Тому розробка вітроенергетичних установок, які працюють на різних швидкостях вітру, є перевагою, оскільки це дозволяє захопити максимальну кількість енергії протягом періоду, коли вітер є більш потужним.

3.8. Використання цифрових накопичувачів для отримання вітроенергетичних характеристик.

Середню швидкість за певний період часу обчислюється шляхом сумування численних вимірів, отриманих протягом цього періоду, і поділом цієї суми на кількість вимірів. За останні десять років було встановлено багато цифрових збірників даних, які зібрали інформацію про середню швидкість вітру, переважно для метеорологічних цілей, порівняно з оцінюванням вітрового потенціалу. Ці збірники даних накопичують інформацію по годинно, після чого обчислюється середнє значення за день, з

яких формується масив для отримання середньомісячного значення. Середнє значення обчислюється наступним чином:

$$V_{\text{усереднене}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.16)$$

Як вказано попереді, для оцінки потужності вітру має велике значення середньоквадратична швидкість:

$$V_{\text{скз}} = \sqrt[3]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^3} \quad (3.17)$$

Дане рівняння не враховує коливання густини повітряної маси, яке є також параметром (згідно з другим рівнянням) вітрової потужності. Крім того, нижче наведено кращий метод для збору інформації щодо вітрової потужності для визначення середньорічної потужності густини:

$$P_{\text{КСЗ}} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot V_i^3 \quad (3.18)$$

Де n=число замірів діапазону усереднення;

ρ_i = густина повітря (кг/м³);

V_i = швидкість вітру за період вимірювань, (м/с);

3.9. Ефект висоти.

Вітер «розтікається» поверхнею землі, при цьому швидкість вітру зростає з підвищенням над поверхнею землі за наступним законом:

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad (3.19)$$

Де V_1 = швидкість вітру на висоті h_1 ;

V_2 = швидкість вітру на висоті h_2 ;

α = коефіцієнт нерівності поверхні;

Коефіцієнт нерівності залежить від типу поверхні: для рівнинної він буде меншим, а для поверхні з перепадами висот - вищим. Величини α для різних типів поверхонь представлені в таблиці 3.1. Швидкість вітру

залишається сталою на певних висотах. Наприклад, на висоті 450 метрів над рівнем моря швидкість вітру може бути в чотири-п'ять разів вищою, ніж на рівні моря.

Ще однією важливою характеристикою є значення граничної швидкості вітру в області розташування вітроенергетичної установки. Ці параметри вітру використовуються для оцінки надійності та тривалості роботи обладнання, а також при проектуванні систем регулювання та виведення роторів з-під впливу вітру. Умови в Україні, де середня швидкість вітру зазвичай не перевищує 5–7 м/с, швидкість вітру під час бурі становить відповідно 40–50 м/с.

Відповідно до методики "Germanischer Lloyd", зовнішні умови поділяються на два типи:

- Нормальні – це події, які мають ймовірність виникнення один раз на рік або частіше;
- Граничні – це події, які мають ймовірність виникнення один раз на 50 років.

Згідно з цими зовнішніми умовами, вітрові енергетичні установки поділяються на п'ять класів: I...IV і S. Ці класи характеризуються десятихвилинним осередненням значень граничної швидкості вітру $\bar{v}_E$ з середньою ймовірністю перевищення швидкості вітру $\bar{v}_M$, яка обчислюється за тривалий період часу (ці обидві швидкості на висоті маччини).

Таблиця 3.1 - Класи ВЕУ за десятихвилинним осередненням величин граничної швидкості вітру $\bar{v}_E$ з середньою ймовірністю підвищення швидкості вітру $\bar{v}_M$,

Клас	I	II	III	IV
$\bar{v}_E$, м/с	50,0	42,50	37,50	30,0
$\bar{v}_M$, м/с	10,0	8,50	7,50	6,0

Максимальна швидкість вітру v_E на рівні висоти маточини, з періодом осереднення 5с та із ймовірністю перевищення раз в 50 років, отримується шляхом перемноження значень $\bar{v}_E$ з таблиці та коефіцієнту 1,4.

Таблиця 3.2 - Вплив типу поверхні на швидкість вітру.

Тип поверхні	Коефіцієнт нерівності поверхні α
Океан, море, озеро, рівнина	0,10
Рівнина із степовим різотрав'ям	0,150
Високі зернові культури, овочі, кущі	0,20
Лісистий сільський масив, багато дерев	0,250
Маленьке місто, мало дерев, кущів	0,30
Міський масив з високими будівлями.	0,40

Таблиця 3.3 - Технічні показники вітроагрегатів, рекомендованих до впровадження

Серед- ньорічна швидкість вітру, м/с	Проміжок робочих швидкостей вітру ВЕУ, м/с	Розрахункова швидкість вітру, яка відповідає номінальний потужності, м/с	Приблизна частка використання ВЕУ, %
До 4,5	3,0-20,0	8,0	40
4,5-5,5	4,0-24,0	9,0	30
понад 5,5	4,0-24,0	10-12	30

3.10. Аеродинамічний розрахунок ротора вітроустановки.

Необхідно спочатку визначити вихідні дані для розрахунків, які включають такі ключові показники:

- передбачувана потужність, яку очікується отримати від вітрової установки (отримана з навантажувальних графіків споживача);
- швидкість вітру, при якій досягається задана потужність;

- швидкохідність (кількість модулів) ротора при максимальному коефіцієнті потужності для даного типу ротора;
- коефіцієнт потужності вітрової установки.

Розрахунок починається з визначення геометричних параметрів ротора, використовуючи рівняння потужності вітрової установки:

$$N = 0,5k\rho F\xi v_n^3, \quad (3.20)$$

де ρ – масова густина повітря, яка відповідає температурі та тиску атмосфери (при $t=15^0C$ і $p = 760$ мм рт.ст. $\rho = 0,125$ кг·с²·м⁻⁴);

F – площа обмахування ротора;

v_n – номінальна швидкість вітру;

ξ – коефіцієнт потужності для вітроустановки;

k – коефіцієнт погодження системних одиниць вимірювання ($k=1/102$ при розрахунку в системі одиниць СІ).

Для крильчастих роторів поверхня обмахування становить:

$$F=0,25\cdot\pi\cdot D^2=0,785\cdot D^2, \quad (3.21)$$

потужність вітроустановки становить (кВт):

$$N = 0,000481D^2v_n^3 \quad (3.22)$$

Діаметр ротора становить:

$$D = 45,6\sqrt{\frac{N}{v_n^3}} \quad (3.23)$$

Для інших значень температур і тиску вводяться поправки в рівняння потужності:

$$N_x = N \frac{B(273+15)}{B_0(273+t)} = \frac{0.38NB}{273+t} \quad (3.24)$$

де B_0 – 760 мм рт.ст. – значення нормального атмосферного тиску;

B – поточне значення тиску.

Тоді діаметр ротора буде становити:

$$D = 74 \sqrt{\frac{N_x(273+t)}{Bv_n^3}}. \quad (3.25)$$

Швидкість вітру, при якій ротор повинен розвивати потрібну для розрахунку потужність, визначається з урахуванням метеоданих місцевості та умов, описаних в пункті 3.3.

Наступним етапом розрахунку є вибір профілю лопатей. Профіль встановлюється під необхідним кутом атаки (α) до результуючої швидкості (c). Кут, який утворюється хордою профілю з віссю ротора, становить суму $\alpha + \beta$. Для кута атаки також подаються коефіцієнти підйомної сили (C_a) згідно з полярами Лілієнтоля, які були отримані експериментальним шляхом для кожного типу профілю.

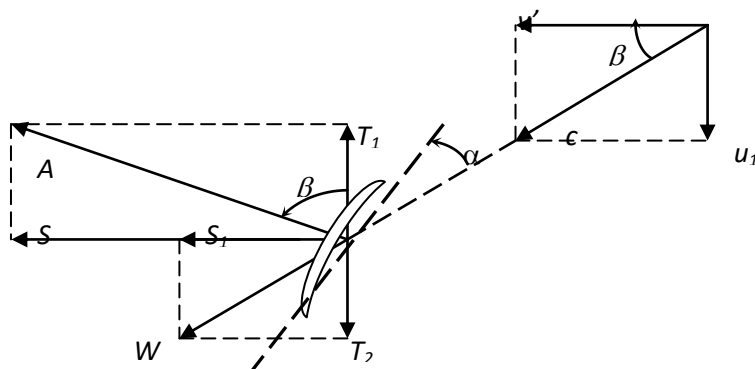


Рисунок.3.1 Дія швидкості та сили на лопаті вітряного двигуна:

v' – швидкість вітру, який проходить через ротор; u_1 – величина відносної швидкості лопаті;
 c – значення результуючої швидкості лопаті; A – величина підйомної сили; T_1 – складова підйомної сили; T_2 – складова сили опору; S_1, S_2 – складові осьової сили; α – кут атаки; β – кут між швидкістю c та віссю обертання ротора.

Визначення параметрів лопаті виконується в наступній послідовності:

1. Обчислення “робочого” діаметру D' вітроустановки:

$$F' = \frac{2P}{\eta_F \xi \rho v^3}, \quad (3.26)$$

де P – потужність вітроустановки;

η_F – коефіцієнт корисної дії лопатей (приблизно 0,9).

$$D' = 3\sqrt{\frac{F'}{2\pi}} = 1.2\sqrt{F'} \quad (3.27)$$

2. Обчислення швидкості на кінцях лопатей:

- задається швидкість вітру (v);
- обчислюється швидкість вітру, який протікає через ротор:

$$v' = \frac{2v}{3} \quad (3.28)$$

- приймається (задається) кількість модулів ротора:

$$u/v = z \quad (3.29)$$

- обчислюється кругова швидкість:

$$u = v \cdot z \quad (3.30)$$

- обчислюється кут β (між вектором результуючої швидкості c та віссю):

$$\beta = \arctg\left(1.5\frac{u}{v}\right) \quad (3.32)$$

- обчислюється результуюча швидкість:

$$c = v \sqrt{\left(\frac{v'}{v}\right)^2 + \left(\frac{u}{v}\right)^2} \quad (3.33)$$

(для швидкохідних вітроустановок $c \approx u$).

3. Обчислення дійсного діаметру D :

- відстань між лопатями вітроустановки:

$$a = \frac{D'\pi}{m} \quad (3.34)$$

де m – число лопатей;

- ширина повітряної смуги між лопатями:

$$b = a \cos\beta \quad (3.35)$$

- діаметр:

$$D = D' + 0.44b \quad (3.36)$$

- довжина кола $= \pi D$;

- кутова швидкість:

$$\omega = \frac{2u}{D} \quad (3.37)$$

- кількість обертів:

$$n = \frac{30\omega}{\pi} \quad (3.38)$$

- оптимальна ширина лопаті:

$$t = \frac{2r\pi}{m} \frac{8}{9c_a} \frac{v}{u} \frac{v}{c} \quad (3.39)$$

4. Визначення ширини і кута встановлення лопаті на $2/3$ радіуса ротора включає наступні етапи:

- Розрахунок довжини кола на $2/3$ радіуса.
- Визначення кількості модулів на $2/3$ радіуса.
- Вибір доцільного профілю за атласом (за полярами Лілієнталя), встановлення оптимального кута атаки та розрахунок коефіцієнта підйомної сили (C_a).
- Визначення доцільної ширини лопаті на $2/3$ радіуса:

$$t = \frac{2r\pi}{m} \frac{8}{9c_a} \frac{v}{u} \frac{v}{c} \quad (3.40)$$

- визначення кута β :

$$\beta = \arctg \frac{3u}{2v} \quad (3.41)$$

- кут встановлення лопаті становить $\beta + \alpha$.

4. Визначення ширини та кута встановлення лопаті на зовнішнім кінці ротора включає наступні кроки:

- Розрахунок довжини кола, яке описує зовнішній кінець лопаті.
- Визначення кількості модулів.
- Прийняття кута атаки та розрахунок коефіцієнта підйомної сили.
- Визначення доцільної ширини лопаті на зовнішньому кінці:

$$t = \frac{2r\pi}{m} \frac{8}{9c_a} \frac{v}{u} \frac{v}{c} \quad (3.42)$$

- визначення кута β :

$$\beta = \arctg \frac{3u}{2v} \quad (3.43)$$

- кут встановлення лопаті становить $\beta + \alpha$.

4. Визначення ширини та кута встановлення лопаті на внутрішньому кінці лопаті (1/3 радіуса) включає наступні кроки:

- Розрахунок довжини кола на 1/3 радіуса.
- Визначення кількості модулів.
- Прийняття кута атаки та розрахунок кута підйомної сили.
- Визначення кута β та кута установки лопаті $\beta + \alpha$.

5. Визначення коефіцієнта якості лопаті включає наступні кроки:

- За обраним профілем та кутом атаки за полярами визначаються коефіцієнти підйомної сили C_a та опору C_w .
- Розраховується коефіцієнт (зворотній) якості:

$$\varepsilon = \frac{C_w}{C_a} \quad (3.44)$$

3.11. Методи розрахунку ресурсів сонячної енергетики.

Методи розрахунку валових ресурсів сонячної енергії в точці А ($\varphi^\circ, \psi^\circ$) та для заданої території S (км^2) на горизонтальному приймальному майданчику передбачають використання повної інформації. Зазвичай, ці методи ґрунтуються на вимірах приходу сонячної радіації на нерухомий горизонтальний приймальний майданчик, оскільки більшість актинометричних станцій світу проводять такі виміри. Отримана величина приходу сонячної радіації на горизонтальний майданчик використовується як кількісна міра оцінки ресурсів сонячної енергії як в точці А ($\varphi^\circ, \psi^\circ$), так і для визначеної території S (км^2).

Наступний крок у розрахунках - перерахунок отриманих даних для горизонтальних площ під впливом різних чинників. Цей перерахунок виконується за допомогою емпіричних формул, залежно від обраної рівня деталізації врахування чинників, які впливають на прихід сонячної радіації. Важливим є врахування орієнтації площадок при цьому.

Ці методи розрахунку приходу сонячної енергії на горизонтальну площу визначають валові ресурси (потенціал) сонячної енергії на поверхні землі.

Під поняттям - валовий потенціал сонячної енергії (СЕ) або сонячного випромінювання (СВ) в визначеній точці земної поверхні А ($\varphi^\circ, \psi^\circ$) зазвичай розуміється середня багаторічна величина СЕ, яка надходить на горизонтальний приймальний майданчик (ПП) з площею 1 м^2 за протягом одного календарного року – $E_{\text{вал}}^P \left(\frac{\text{кВт*год}}{\text{м}^2*\text{рік}} \right)$. Щоб отримати достатньо достовірне значення $E_{\text{вал}}^P$, потрібно мати інформацію щодо приходу СЕ на горизонтальний майданчик протягом тривалого періоду часу Т (роки), який перевищує 11-літній сонячний цикл (цикл Вольфа), оскільки надходження СЕ може змінюватися від року до року.

У випадку наявності даних про безперервний в часі прихід сумарної сонячної радіації (СР) на горизонтальну поверхню - $R_{\text{г}} S(t)$ протягом

тривалого періоду часу T (роки), значення $E_{\text{вал}}^P$ можна розрахувати за наступною формулою:

$$E_{\text{вал}}^P = \frac{\sum_{k=1}^d E_{\text{вал}k}^P}{d} \quad (3.45)$$

де d - кількість розрахункових років; $E_{\text{вал}k}^P$ - прихід СВ на горизонтальний майданчик протягом k -того року, який розраховується по формулі:

$$E_{\text{вал}k}^P = \int_0^{\text{Тріч}} R_{\Sigma}^P(t) dt \quad (3.46)$$

Далі необхідно розрахувати валові ресурси сонячного випромінювання (СВ) для заданої території S (км²) за умови наявності даних про безперервний в часі прихід СВ на горизонтальну приймальну площу в необхідному числі розрахункових точок A_j ($\varphi^\circ, \psi^\circ$), де $j=1, \dots, m$, що рівномірно розподілені по території S . Це припускається в умовах можливості застосування лінійної або іншої форми інтерполяції для отримання значень сонячного випромінювання (СВ) між заданими точками A_j ($\varphi^\circ, \psi^\circ$).

В такому випадку, вся територія S (км²) передбачено поділяється на кілька представницьких зон, в кожній з яких можна розрахувати середньо-багаторічний прихід сонячного випромінювання (СВ) для l -ї зони площею S_l (км²) - $E_{\text{вал}}^P \left(\frac{\text{кВт*год}}{\text{м}^2 * \text{рік}} \right)$, використовуючи відомі закони інтерполяції для початкових даних в розрахункових точках A_j ($\varphi^\circ, \psi^\circ$) - $R_{\Sigma j}^P(t)$. Наприклад, якщо розглядати одиничну l -у зону прямокутного перетину з 4-ма початковими точками у вузлах, де відомі значення $R_{\Sigma 1}^P(t)$, $R_{\Sigma 2}^P(t)$, $R_{\Sigma 3}^P(t)$, $R_{\Sigma 4}^P(t)$ за лінійним законом інтерполяції значень $R_{\Sigma}^A(t)$ між ними, то величину $E_{\text{вал}}^P \left(\frac{\text{кВт*год}}{\text{м}^2 * \text{рік}} \right)$ можна розрахувати за наступною формулою:

$$E_{\text{вал}l}^P(S_l) = S_l * 10^6 * \int_0^{\text{Тріч}} \overline{R_{\Sigma l}}^P(t) dt, \quad (3.47)$$

де Sl (км²), а $\overline{R}_{Sl}^P(t)$ обчислюється як середньозважена величина для 4-ої зони з лінійною інтерполяцією між заданими 4-ма значеннями $R_{\Sigma}^P(t)$ в вузлах l -ї зони, тобто:

$$\overline{R}_{Sl}^P(t) = 0,25 * (R_{\Sigma 1}^P(t) + R_{\Sigma 2}^P(t) + R_{\Sigma 3}^P(t) + R_{\Sigma 4}^P(t)) \quad (3.48)$$

В такому випадку валові ресурси СВ для площі S (км²) – $E_{\text{вал}}^P$, яка складається із інтервалу S_l , ($l=1., r$) обчислюються за формулою:

$$E_{\text{вал}}^P(S) = \sum_{l=1}^r E_{\text{вал}l}^P(S_l) \quad (3.49)$$

де $E_{\text{вал}}^P(S)$ - прихід СВ на горизонтальну поверхню землі площею S (км²) за проміжок часу рівний одному року. в залежності від значення S , значення $E_{\text{вал}}^P(S)$ вимірюється в кВт·год, Мвт·год, Гвт·год чи Твт·год.

Для вирішення цього завдання можна використовувати сучасні програмні засоби, які дозволяють знаходити інтегральні значення досліджуваного параметра на будь-якій складній по конфігурації території S (км²). Один із прикладів таких програмних засобів - система "Surfer-8". Ця система має широкі можливості, які в даному випадку можна використовувати наступним чином.

Для території S (км²) задаються всі відомі дані по сонячному випромінюванню (СВ) в ряду точок A , розташованих на заданій території s (км²) або в невеликому віддаленні від її меж. За допомогою системи "Surfer-8" за заданими значеннями $R_{\Gamma} S$ в кожній точці A ($\varphi^{\circ}, \psi^{\circ}$), система розраховує топограму ізоліній постійних значень сонячного випромінювання $R_{\Gamma} S$ з заданою користувачем дискретністю. Далі, керуючись отриманими ізолініями $\overline{R}_{Sl}^P = \text{const}$ по усій території S (км²), система "Surfer-8" інтегрує величину $\overline{R}_{Sl}^P$ (Вт/м²), визначаючи тим самим для неї значення валових ресурсів сонячного випромінювання. Зазвичай можна отримати інформацію

щодо $R_{\Gamma} S(t)$ у вигляді середньоінтервальних значень протягом заданих розрахункових інтервалів часу - Δt (години, доба, місяць, рік), тобто $\bar{R}_{\Sigma l}^P(\Delta t)$. В такому випадку визначення $E_{\text{валк}}^P$ для точки $A(\varphi^\circ, \psi^\circ)$ та $E_{\text{валл}}^P(S_l)$ може бути виконаний за наступними формулами:

$$E_{\text{валк}}^P = \sum_{i=1}^n \bar{R}_{\Sigma l}^P(\Delta t_i) * \Delta t_i \quad (3.50)$$

$$E_{\text{валл}}^P(S_l) = S_l * 10^6 * \sum_{i=1}^n \bar{R}_{\Sigma l}^P(\Delta t_i) * \Delta t_i \quad (3.51)$$

$$\bar{R}_{\Sigma l}^P(t) = 0,25 * (\bar{R}_{\Sigma 1}^P(t) + \bar{R}_{\Sigma 2}^P(t) + \bar{R}_{\Sigma 3}^P(t) + \bar{R}_{\Sigma 4}^P(t)) \quad (3.52)$$

при умові, що календарний рік - $T_{\text{год}}$ (година) поділений на n розрахункових інтервалів з тривалістю Δt_i кожен:

$$T_{\text{год}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (3.53)$$

Як розрахункові інтервали тут зазвичай використовуються Δt_i рівні 1 добі або 1 місяцю. Подібна інформація сьогодні може бути отримана з певним ступенем точності по декількох загальновідомих базах даних по СВ на землі в цілому (база NASA).

При розрахунку енергопотенціалу місцевості використовують два типи розрахункових алгоритмів котрі пристосовані для роботи з базами даних NASA, JRC. При використанні міжнародної бази даних NASA розрахунок валових ресурсів для території S (км²) дещо ускладнюється не міняючи своїх принципових положень.

Існуючі бази даних (кліматологічних характеристик) потрібних для розрахунку енергопотенціалів місцевості мають бути вдосконалені, щоб враховувати сучасні глобальні зміни у кліматі а також локальні особливості клімату місцевості – антропогенного характеру. Як альтернатива - можна створити нову базу даних, котра врахувала – б вищевказані недоліки і дозволила проводити оцінку енергопотенціалів з вищою точністю.

4 РОЗРОБКА КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПІДПРИЄМСТВА

Після аналізу доступних літературних джерел, присвячених системам з використанням відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), можна зробити висновок, що для умов сільськогосподарського виробництва (АПК) найбільш практичним вибором є сонячні електростанції. Цей вибір обумовлений рядом переваг, які вони мають у порівнянні з іншими видами відновлювальних джерел енергії. Важливо відзначити, що недоліки сонячних електростанцій можуть частково компенсуватися шляхом їх інтеграції з енергосистемою, зокрема, за допомогою комбінованого електропостачання.

4.1. Комбіновані системи електропостачання з фотоелектричними установками.

Для ефективної роботи фотоелектричних модулів потрібно використовувати додаткові елементи в системі, такі як кабелі, контролер заряду, інвертор і інші. Зазвичай така комплексна система називається сонячною фотоелектричною системою або сонячною станцією. Існують три основних типи сонячних фотоелектричних систем:

- Автономні системи окремих споживачів.
- Системи, поєднані з мережею.
- Системи резервного живлення.

1. Автономні системи окремих споживачів. Такі автономні фотоелектричні системи ефективно використовуються там, де немає доступу до централізованого електропостачання. Вони працюють незалежно від електричних мереж і призначені для живлення окремих споживачів, таких як

освітлення чи системи водопостачання, розташовані вдалині від централізованих мереж.

У періоди відсутності яскравого сонячного світла або в темний час доби використовуються акумуляторні батареї, які зберігають електроенергію. Такі системи часто використовуються для автономного електропостачання окремих будинків. Малими системами можна жити базові пристрої, такі як освітлення, телевізор і холодильник, а більш потужні системи можуть обслуговувати водяний насос, додаткові побутові прилади і т.д.

Така система включає в себе сонячні панелі, контролер, акумуляторну батарею, кабелі та підтримуючу структуру (рис. 4.2).

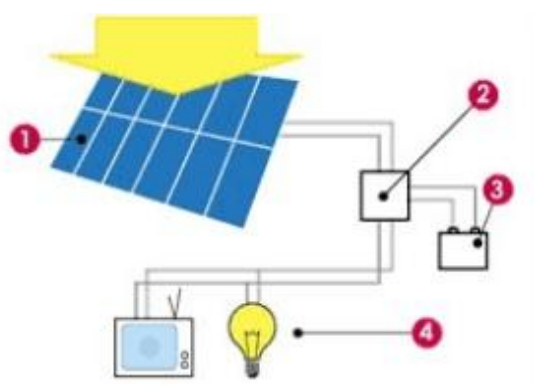


Рисунок 4.1 - Схема автономної системи з ФЕУ:

1 – сонячні панелі; 2 – контролер; 3 – АКБ; 4 – навантаження

2. Системи поєднані з мережею. Системи, які з'єднані з електричною мережею, використовуються разом із централізованою електричною мережею. Ці системи приєднуються до електричної мережі та можуть виробляти електроенергію, передаючи надлишки в мережу. Також вони можуть отримувати електроенергію з мережі у випадках, коли це необхідно.

При наявності достатньої кількості підключених фотоелектричних модулів частина споживачів може отримувати енергію від сонячних панелей. Об'єднані з електричною мережею фотоелектричні системи, зазвичай, складаються з одного чи кількох модулів, інвертора, кабелів, що утримують

структури і споживачів. Інвертор використовується для з'єднання фотоелектричних панелей з електричною мережею, перетворюючи постійний струм на змінний струм з напругою 220 В/380 В та частотою 50 Гц. Схема комбінованої системи електропостачання із фотоелектричними установками представлена на рисунку 4.2.

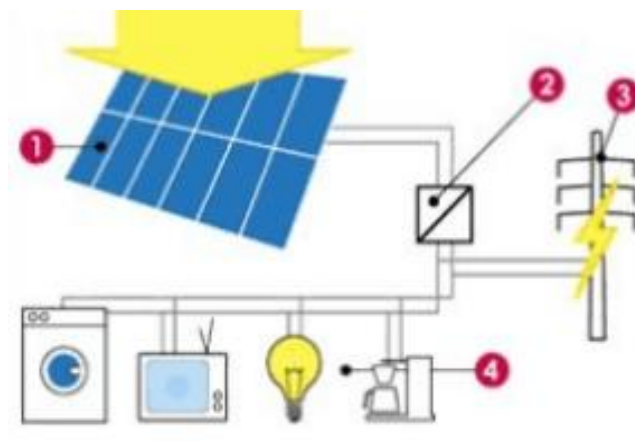


Рисунок 4.2 - Схема автономної системи з ФЕУ:

1 – сонячні панелі; 2 – інвертор; 3 – мережа (енергосистема);
4 – навантаження

3. Резервні сонячні системи. Резервні сонячні системи використовують централізоване електропостачання, але може виникнути ситуація, коли мережа не є надійною. Ці системи комбінують елементи автономних та систем, що з'єднані з мережею, для забезпечення резервного живлення під час відключень мережі чи аварій. Вони застосовуються для електропостачання в періоди, коли основне електропостачання відсутнє.

Малі резервні сонячні системи електропостачання використовуються для живлення найважливіших навантажень, таких як освітлення, комп'ютер та засоби зв'язку (телефон, радіо, факс і т. д.). Більш потужні системи можуть також забезпечувати енергією холодильник під час відключення від мережі. За чим більша потужність необхідна для живлення відповідального навантаження і чим триваліше періоди відключення від мережі, тим більша потужність фотоелектричної системи необхідна. Система включає в себе

фотоелектричні модулі, контролер, акумуляторну батарею, кабелі, інвертор, навантаження і підтримуючу структуру. Структурну схему аварійної системи з фотоелектричним устаткуванням представлено на рис. 4.3.

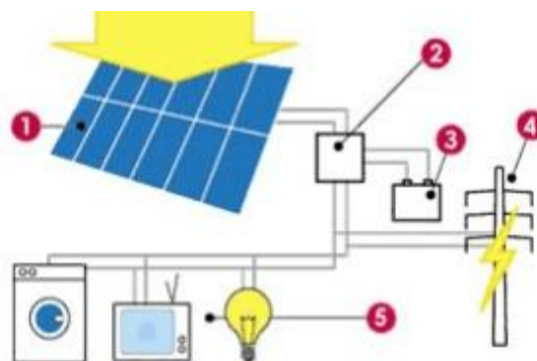


Рисунок 4.3 - Схема аварійної системи з ФЕУ:

1 – сонячна панель; 2 – інвертор; 3 – АКБ; 4 – електромережа (енергосистема);
5 – навантаження

4.2. Структура комбінованої системи електропостачання.

У місті Кропивницький та Кіровоградській області, враховуючи географічні та кліматичні умови, а також наявність та енергетичний потенціал різних джерел відновлювальної енергії, найбільш раціональним вибором є використання сонячної електростанції (СЕС) у комбінованій системі електропостачання. У випадку високої надійності електропостачання від енергосистеми, використання акумуляторних батарей як основних або аварійних накопичувачів електроенергії не є ефективним.

Загальна структурна схема комбінованої системи електропостачання із сонячною електростанцією, яка працює паралельно з електричною мережею, подана на рис. 4.4.

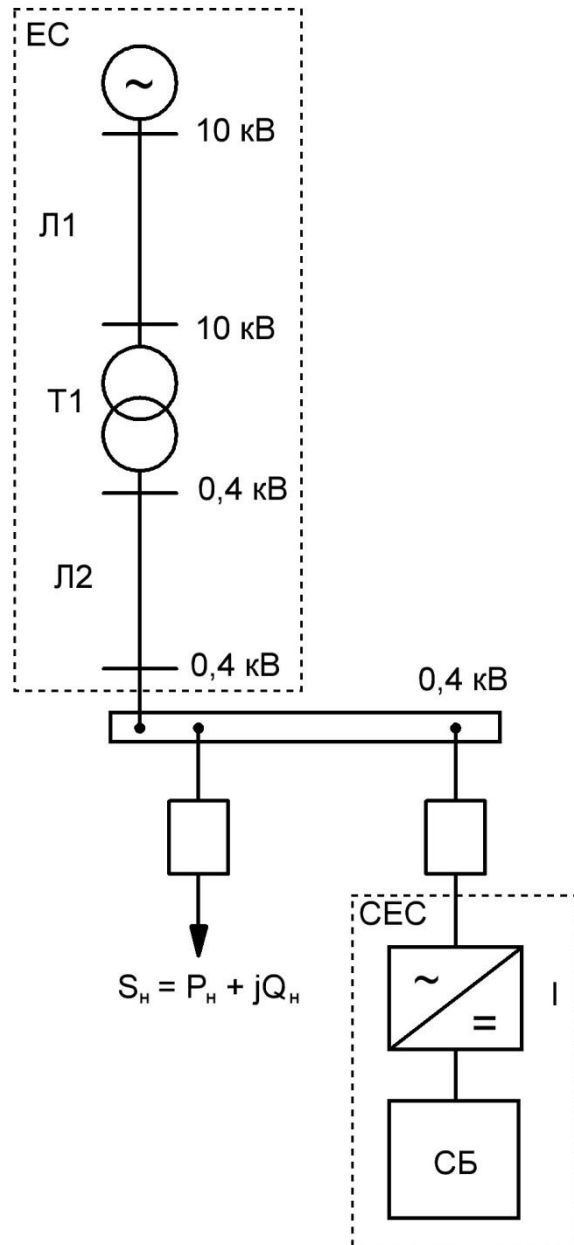


Рисунок 4.4 - Узагальнена схема комбінованої системи електропостачання з сонячною електростанцією, яка працює паралельно з мережею живлення:

ЕС – енергетична система; Л1 – лінія електропередач 10 кВ; Т1 – знижувальний трансформатор 10/0,4 кВ; Л2 – лінія електропередач 0,4 кВ; $S_n = P_n + jQ_n$ – навантаження електроспоживачів підприємства; СЕС – сонячна електростанція; I – інвертор; СБ – сонячна батарея.

4.3. Визначення доцільного кута нахилу сонячної панелі для географічних умов Кіровоградської області.

Кількість сонячної радіації, що потрапляє на приймаючу поверхню, залежить від положення Сонця відносно цієї поверхні. У випадку, коли немає можливості регулювання кута нахилу, сонячні батареї повинні бути розташовані під оптимальним кутом. Зазвичай цей кут визначається як широта місцевості плюс 20° . Для кожної широти існує власний оптимальний кут нахилу фотоелектричних модулів. Невеликі відхилення до 5 градусів від цього оптимуму мають незначний вплив на продуктивність сонячних панелей. Стаціонарні конструкції зазвичай орієнтовані на південь з невеликими відхиленнями по азимуту.

Для більш точного розрахунку оптимального кута нахилу можна скористатися наступною методикою.

Середньогодинну величину енергетичної освітленості площі I_β , яка орієнтована точно на південь і нахилена під кутом β відносно горизонту можна визначити за формулою:

$$I_\beta = I_{\text{пд}} \sin \beta + I_{\text{гор}} \sin(90^\circ - \beta), \quad (4.1)$$

де $I_{\text{пд}}$, $I_{\text{Г}}$ – середньогодинна величина енергетичної освітленості площ, які орієнтовані на південь та на горизонтальну поверхню, Вт/м^2 .

Середньогодинні величини енергетичної освітленості площ $I_{\text{пд}}$, $I_{\text{Г}}$ для відповідних днів року для географічних умов м. Кропивницький наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Середньогодинні величини енергетичної освітленості площ $I_{\text{пд}}$, $I_{\text{г}}$ для визначених днів року

Години	Енергетична освітленість, I , Вт/м ²			
	Січень		Липень	
	Південь	Горизонт	Південь	Горизонт
0 – 1	-	-	-	-
1 – 2	-	-	-	-
2 – 3	-	-	-	-
3 – 4	-	-	-	-
4 – 5	-	-	-	8,0
5 – 6	-	-	-	56,0
6 – 7	-	-	-	164,0
7 – 8	17,0	1,0	11,0	297,0
8 – 9	205,0	34,0	119,0	437,0
9 – 10	387,0	111,0	221,0	553,0
10 – 11	523,0	183,0	296,0	638,0
11 – 12	589,0	222,0	339,0	679,0
12 – 13	589,0	222,0	339,0	681,0
13 – 14	521,0	183,0	297,0	636,0
14 – 15	389,0	111,0	220,0	553,0
15 – 16	203,0	34,0	118,0	437,0
16 – 17	18,0	1,0	12,0	295,0
17 – 18	-	-	-	164,0
18 – 19	-	-	-	57,0
19 – 20	-	-	-	7,0
20 – 21	-	-	-	-
21 – 22	-	-	-	-
22 – 23	-	-	-	-
23 – 24	-	-	-	-
Всього протягом доби	3441	1102	1970	5663

Для визначення оптимального кута нахилу потрібно побудувати графік залежності сумарної енергетичної ефективності I_{β} від значень кутів нахилу β , яку розрахованою за допомогою формули (4.1). Результати цих розрахунків представлені в табл. 4.2 та на графіку 4.4.

Таблиця 4.2. Значення добової енергетичної освітленості $E_{\text{доб}}$, Вт·год/м², в залежності від кута нахилу сонячної панелі β .

Кут, β , °	Енергетична освітленість за добу $E_{\text{доб}}$, кВт·год/м ²	
	Січень	Липень
0	3,44	1,97
5	3,52	2,46
10	3,58	2,92
15	3,61	3,37
20	3,61	3,78
25	3,58	4,18
30	3,53	4,54
35	3,45	4,86
40	3,34	5,15
45	3,21	5,39
50	3,06	5,61
55	2,88	5,77
60	2,67	5,89
65	2,45	5,97
70	2,21	5,99
75	1,96	5,98
80	1,68	5,92
85	1,39	5,81
90	1,10	5,66

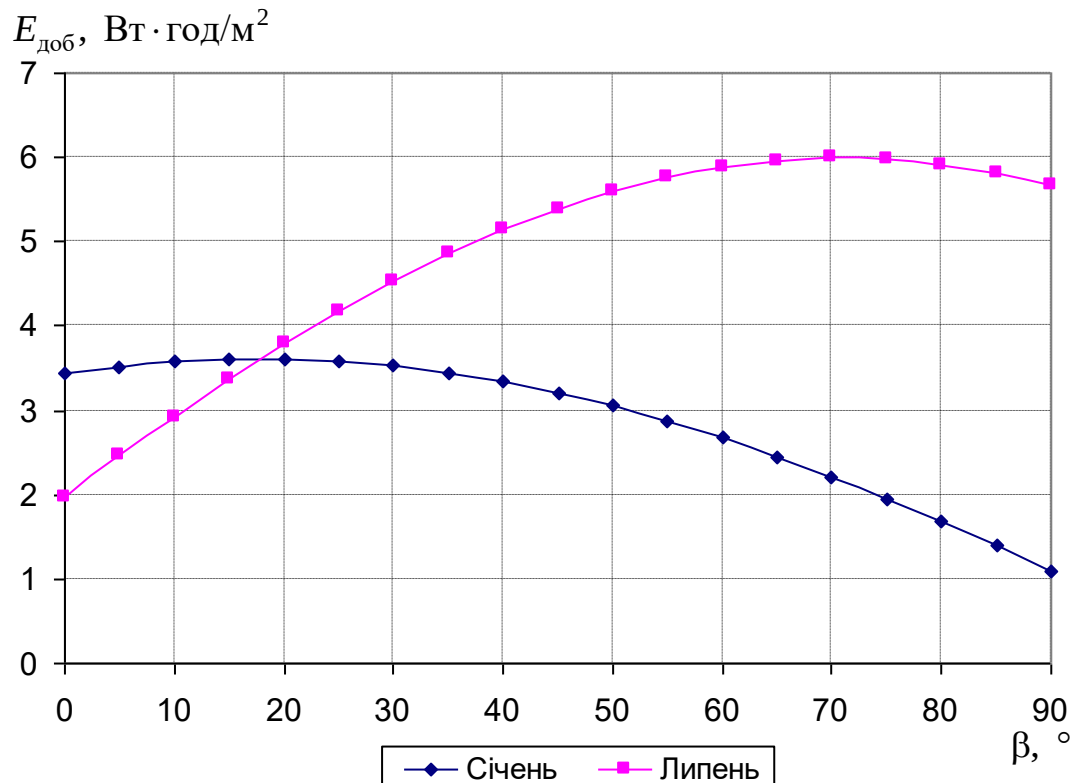


Рисунок 4.5 - Графіки залежності енергетичної освітленості $E_{\text{доб}}$, Вт·год/м² за добу, залежно від кута нахилу сонячної батареї β

В результаті аналізу можна визначити, що добова енергетична освітленість у січні досягає свого піку на рівні $E = 3,608$ кВт·год/м² при нахилі $\beta = 15^\circ$, тоді як у липні максимальне значення становить $E = 5,996$ кВт·год/м² при куті нахилу $\beta = 70^\circ$. Оскільки енергетична освітленість влітку істотно перевищує показники зими, оптимальний кут нахилу сонячних батарей встановлюється на рівні $\beta = 70^\circ$ (за умови відсутності пристроїв для регулювання положення сонячної батареї в просторі). Значення середньогодинної енергетичної освітленості поверхні сонячних батарей з нахилом $\beta = 70^\circ$ у характерних зимовій та літній періодах наведено в таблиці 4.3 та на рисунку 4.6.

Таблиця 4.3. Середньогодинна енергетична освітленість поверхні сонячних батарей при куті нахилу $\beta = 70^\circ$ для зимової та літньої доби

Кут нахилу, $\beta, ^\circ$	Енергетична освітленість I_β , Вт/м ²	
	Січень	Липень
0 – 1	-	-
1 – 2	-	-
2 – 3	-	-
3 – 4	-	-
4 – 5	-	7,50
5 – 6	-	52,60
6 – 7	-	155,0
7 – 8	7,10	282,30
8 – 9	101,70	450,10
9 – 10	237,0	595,80
10 – 11	350,50	700,20
11 – 12	409,70	754,60
12 – 13	409,70	754,60
13 – 14	350,50	700,20
14 – 15	237,0	595,80
15 – 16	101,70	450,10
16 – 17	7,10	282,30
17 – 18	-	155,0
18 – 19	-	52,60
19 – 20	-	7,50
20 – 21	-	-
21 – 22	-	-
22 – 23	-	-
23 – 24	-	-

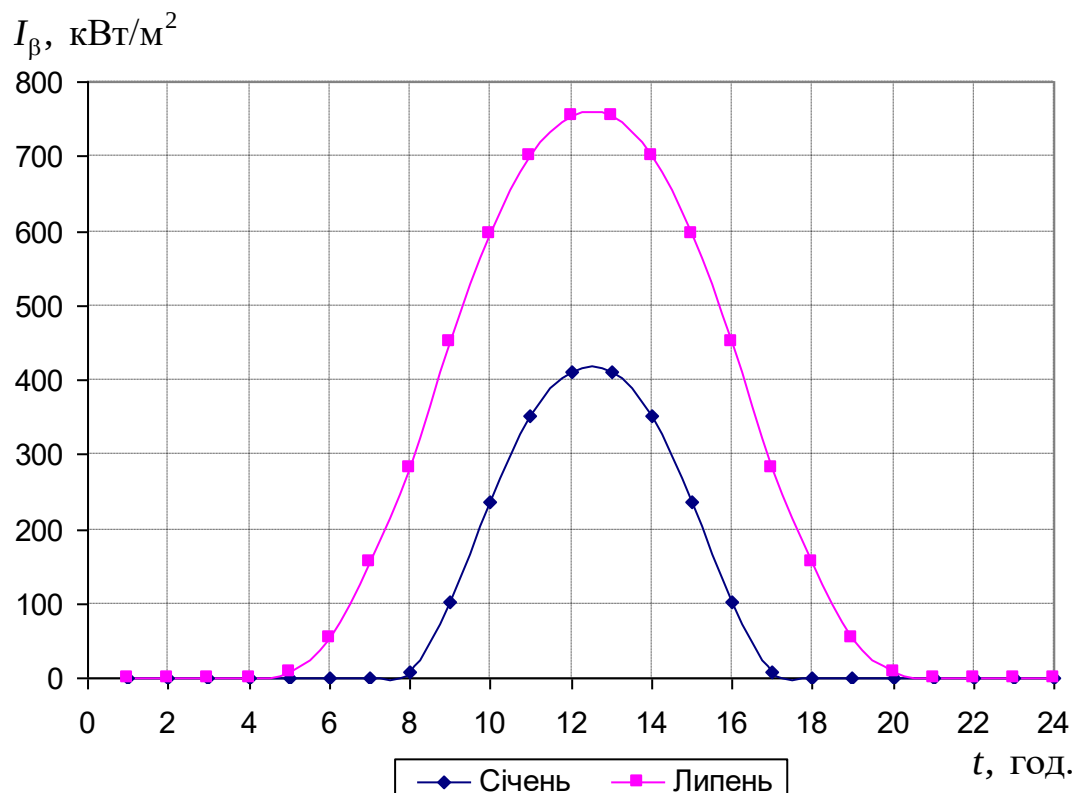


Рисунок 4.6 - Графік залежності величин середньогодинної енергетичної освітленості поверхні сонячних панелей при куті нахилу $\beta = 70^\circ$ для зимової та літньої доби

4.4. Розрахунок параметрів СЕС та вибір обладнання комбінованої системи електропостачання.

На структурній схемі комбінованої системи електропостачання визначено, що основними компонентами сонячної електростанції (СЕС), відповідальними за виробництво електроенергії, є сонячні батареї. Ці батареї перетворюють енергію сонячного випромінювання в електричну енергію постійного струму. Крім того, на структурній схемі виділено ще один ключовий елемент - інвертор. Інвертор виконує завдання перетворення постійного струму, який генерується сонячними батареями, у трьохфазний змінний струм з напругою 0,4 кВ.

4.4.1. Розрахунок площі для встановлення СЕС. Для розрахунку розглянемо земельну ділянку, яка розташована біля фермерського господарства з такими характеристиками:

- ширина $d = 40$ м
- довжина $c = 74$ м;
- кут нахилу батареї $\alpha = 70^\circ$;
- висота від поверхні землі до масиву $a = 0,5$ м;
- розміри обраної панелі (ВхШхТ): 1984х992х35 мм

Розрахуємо проекцію масиву на поверхню землі:

$$B' = \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot B = \cos\left(70 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot 1984 = 1983,51 \text{ мм}$$

Обчислюємо лінійну довжину масиву:

$$D = \sin\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot B = \sin\left(70 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot 1984 = 42,1 \text{ мм}$$

Обчислюємо відстань від поверхні землі до найвищої точки масиву:

$$A = D + a = 42,2 + 500 = 542,2 \text{ мм}$$

На основі виконаних розрахунків та наявних даних знаходимо потрібну відстань між масивами сонячних батарей:

$$l = \frac{D}{\operatorname{tg}\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right)} = \frac{2}{\operatorname{tg}\left(70 \cdot \frac{\pi}{180}\right)} = 1979 \text{ мм}$$

Загальна періодичність розміщення обчислюється за формулою:

$$L = l + B' = 1979 + 1983 = 3962 \text{ мм}$$

Визначаємо число рядів розміщених на поверхні землі:

$$N_m = \frac{d}{L} = \frac{40}{3962 \cdot 10^{-3}} \approx 10 \text{ шт}$$

Загальна площа розміщення панелей:

$$S = c \cdot d = 74 \cdot 40 = 2960 \text{ м}^2$$

Розташування масивів сонячних батарей з горизонтальним розміщенням модулів з урахуванням зони затінення показана на рис.4.7.

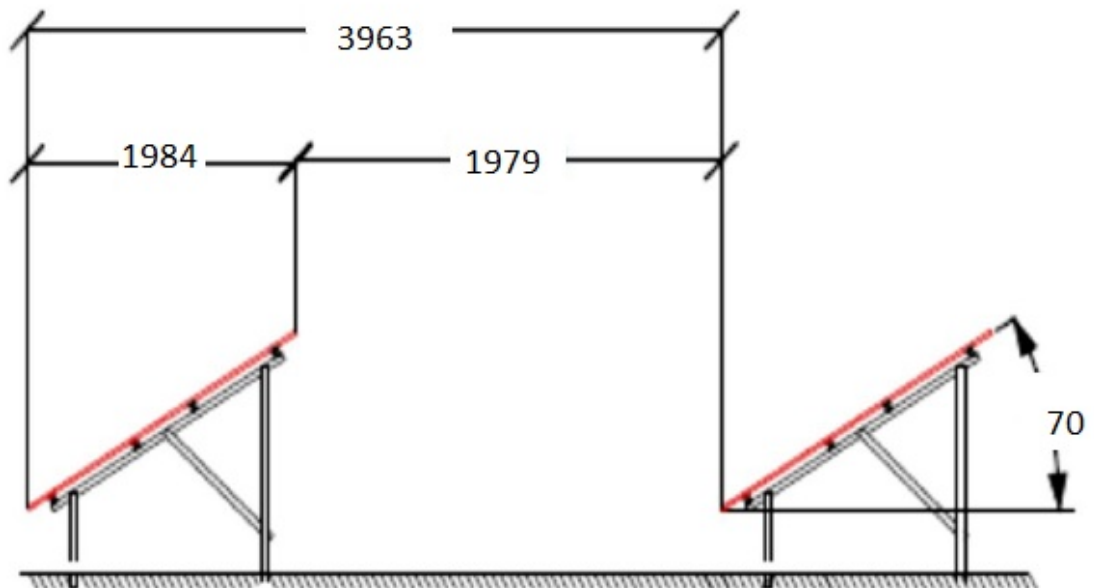


Рисунок 4.7 - Схема розміщення ФЕМ

4.4.2 Вибір типу та числа сонячних модулів.

Проведемо розрахунок для визначення необхідної кількості сонячних батарей, враховуючи потрібну потужність генерації та технічні можливості їх розташування на території підприємства [9].

Основною метою встановлення сонячної електростанції є зниження витрат на електроенергію, спожиту від електромережі.

Потрібна потужність СЕС:

$$P_{\text{СЕС}} = 0,667 P_p = 0,667 \cdot 300 = 200,1$$

Для встановлення приймаємо фотоелектричні модулі типу TRINA SOLAR 260P номінальною потужністю 260 Вт кожний. Основні технічні характеристики фотоелектричних модулів TRINA SOLAR 260P представлені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Технічні характеристики фотоелектричних модулів TRINA SOLAR 260P.

№ з/П	Найменування параметра	Значення
1	Максимальна потужність, P_m , Вт	260
2	Напруга холостого ходу, U_{xx} , В	38,2
3	Струм короткого замикання, I_k , А	9,00
4	Струм в режимі максимальної потужності, $I_{мп}$, А	8,5
5	Напруга в режимі максимальної потужності, $U_{мп}$, В	30,6
6	Відносне значення ефективності, %	15,9

Число фотоелектричних модулів, які забезпечують потрібну потужність СЕС:

$$N_{\text{ФЕМ}} = \frac{P_{\text{СЕС}}}{P_{\text{ФЕМ}}} = \frac{200}{0,26} = 770 \text{ кВт.}$$

Для забезпечення потрібної потужності, враховуючи втрати потужності в ФЕМ та інверторах обираємо кількість ФЕМ $N_{\text{ФЕМ}} = 800$ шт.

Встановлена потужність ФЕМ:

$$P_{\text{СЕС}} = N_{\text{ФЕМ}} P_{\text{ФЕМ}} = 0,26 \cdot 800 = 208$$

4.4.3 Вибір типу та кількості інвертора.

Враховуючи вибраний тип фотоелектричних модулів і провівши аналіз доступних інверторів різних виробників, вирішили встановити інвертор типу Sunny Tripower 15000TL. Технічні характеристики цього інвертора Sunny Tripower 15000TL представлені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Технічні характеристики інвертора Sunny Tripower 15000TL.

№ з/п	Найменування показника	Значення
1	Номинальна потужність кВт	15
2	Максимальна величина струму, А	33
3	Номинальна повна потужність, кВА	15,34
4	Максимальне значення напруги на постійному струмі, В	1000
5	Максимальний вихідний змінний струм. А	24
6	Оптимальні межі напруги постійного струму, В	360-800
7	Значення вихідної напруги, В	380
8	Діапазон допустимих частот в мережі, Гц	44÷55
9	ККД, %	98,2

5 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ КОМБІНОВАНОЇ СЕП СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПІДПРИЄМСТВА

Існує значна кількість методів для аналізу роботи систем електропостачання, включаючи експериментальні та розрахункові, в тому числі комбіновані. Один із широко використовуваних методів у цьому аналізі - використання комп'ютерних імітаційних моделей. Цей підхід дозволяє з високою точністю для інженерних та наукових цілей проводити аналіз параметрів роботи систем електропостачання.

Для аналізу режимів роботи комбінованої системи електропостачання з відновлювальною джерелом енергії (ВДЕ) необхідно вирішити такі завдання:

- розробка математичної моделі сонячної електростанції (СЕС) та її ключового елементу - фотоелектричної установки (ФЕУ);
- створення комп'ютерної імітаційної моделі комбінованої системи електропостачання, яка включає сонячну електростанцію.

5.1. Математична модель фотоелектричної установки.

Розрахуємо вихідну потужність фотоелектричної батареї (ФЕБ) за наступним виразом: [10]

$$P_{\text{ФЕБ}}(t) = P_{\text{ФЕБном}} k_{\text{з.е.}} \frac{\bar{I}_{\beta}(t)}{I_{\text{СУ}}} [1 + \alpha_P (\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) - \vartheta_{\text{СУ}})]; \quad (5.1)$$

де: $P_{\text{ФЕБном}}$ – номінальна потужність ФЕБ, кВт;

$k_{\text{з.е.}}$ – коефіцієнт спаду ефективності ФЕБ;

$\bar{I}_\beta(t)$ – усереднена густина потоку сонячного випромінювання, що потрапляє на поверхню ФЕБ за певний час, Вт/м²;

$I_{\text{СУ}}$ – густина потоку сонячного випромінювання, що потрапляє на поверхню ФЕБ, кВт/м²;

α_P – температурний коефіцієнт потужності ФЕБ, °С⁻¹ (зазвичай значення α_P від’ємне, тому що ефективність ФЕБ знижується з підвищенням температури);

$\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t)$ – миттєва температура ФЕБ, °С;

$\vartheta_{\text{СУ}}$ – температура ФЕБ на СУ, °С.

На рис. 5.1 представлена еквівалентна схема заміщення сонячної батареї.

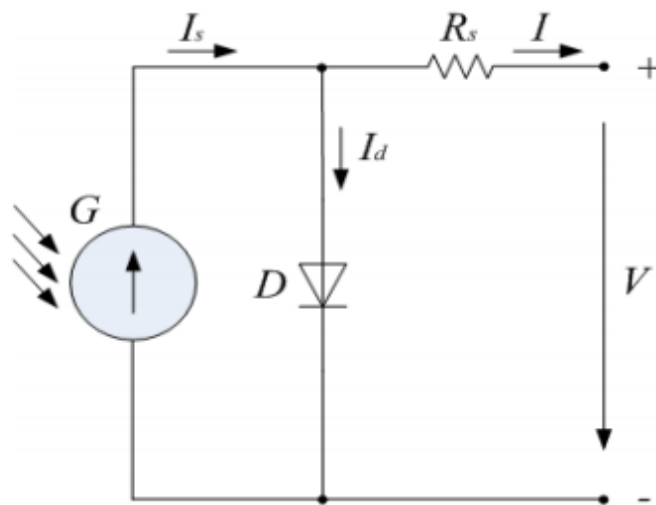


Рисунок 5.1 - Еквівалентна схема заміщення сонячної батареї.

У стандартних умовах, термін визначається наступними параметрами: густина потоку сонячного випромінювання $I_{\text{СУ}} = 1 \text{ кВт/м}^2$ та температура поверхні фотоелектричного блоку (ФЕБ) $\vartheta_{\text{ФЕБ}} = 25 \text{ °С}$. Параметри, отримані при цих умовах, називаються номінальними параметрами ФЕБ.

Якщо не враховувати зміну потужності фотоелектричного блоку при зміні температури, то формула (5.1) буде спрощеною:

$$P_{\text{ФЕБ}}(t) = P_{\text{ФЕБном}} k_{\text{з.е.}} \frac{\bar{I}_{\beta}(t)}{I_{\text{су}}}; \quad (5.2)$$

Температура фотоелектричного блоку (ФЕБ) визначається температурою його поверхні. Протягом нічної частини доби температура поверхні батареї рівна температурі навколишнього середовища. Однак за наявності сонячного освітлення температура поверхні ФЕБ може перевищувати температуру оточуючого середовища на понад 30°C.

Для визначення температури ФЕБ можна скористатися рівнянням балансу потужностей [4], яке враховує зважене взаємодію сонячної енергії, що падає на ФЕБ, електричної потужності і тепловіддачі в навколишнє середовище:

$$\tau \alpha I_{\beta}(t) = \eta_{\text{ФЕБ}} I_{\beta}(t) + \alpha_{\text{ФЕБ}} [\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) - \vartheta_0(t)]; \quad (5.3)$$

де τ – коефіцієнт проникнення ФЕБ;

α – коефіцієнт поглинання ФЕБ;

$I_{\beta}(t)$ – величина густини потоку сонячного випромінювання, що потрапляє на поверхню ФЕБ, кВт/м²;

$\eta_{\text{ФЕБ}}$ – коефіцієнт корисної дії ФЕБ;

$\alpha_{\text{ФЕБ}}$ – коефіцієнт тепловіддачі ФЕБ в зовнє середовище, кВт/(м²·°C);

$\vartheta_0(t)$ – температура зовнього середовища, °C.

Розв'язавши (5.3), отримуємо:

$$\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) = \vartheta_0(t) + I_{\beta}(t) \frac{\tau \alpha}{\alpha_{\text{ФЕБ}}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{ФЕБ}}}{\tau \alpha} \right); \quad (5.4)$$

По причині, що дуже важко практично виміряти величину $\frac{\tau \alpha}{\alpha_{\text{ФЕБ}}}$ використовують технічні показники виробників. При режимі роботи без навантаження (5.4) має вигляд:

$$\frac{\tau \alpha}{\alpha_{\text{ФЕБ}}} = \frac{\vartheta_{\text{ФЕБ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}}{I_{\text{ном}}}; \quad (5.5)$$

де $\vartheta_{\text{ФЕБ ном}}$ — номінальна випробувальна робоча температура ФЕБ, °С;

$\vartheta_{0 \text{ ном}}$ — температура оточуючого простору, при якій проводяться випробування і позначається як $\vartheta_{\text{ФЕБ ном}}$, °С, (зазвичай $\vartheta_{0 \text{ ном}} = 20 \text{ °С}$);

$I_{\text{ном}}$ — величина густини потоку сонячного випромінювання, що падає на поверхню ФЕБ при проведенні випробувань, кВт/м², (зазвичай $I_{\text{ном}} = 800 \text{ Вт/м}^2$).

Для спрощення приймемо, що величина $\frac{\tau \alpha}{\alpha_{\text{ФЕБ}}}$ постійна, тоді вираз (4.4) можна представити у наступному вигляді:

$$\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) = \vartheta_0(t) + I_{\beta}(t) \frac{\vartheta_{\text{ФЕБ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}}{I_{\text{ном}}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{ФЕБ}}}{\tau \alpha} \right); \quad (5.6)$$

Вважаємо, що величина $\tau \alpha = 0,9$ [4]. Виходячи з того, що величина $\frac{\eta_{\text{ФЕБ}}}{\tau \alpha}$ значно менша одиниці, попереднє припущення не має значної похибки.

Також припустимо, що система керування фотоелектричного блоку (ФЕБ) автоматично підтримує режим роботи в точці відбирання максимальної потужності. Це вказує на те, що коефіцієнт корисної дії (ККД) ФЕБ завжди досягає максимально можливого значення:

$$\eta_{\text{ФЕБ}} = \eta_{\text{ФЕБ max}}; \quad (5.7)$$

де $\eta_{\text{ФЕБ max}}$ – коефіцієнт корисної дії ФЕБ в точці відбирання максимальної потужності.

Враховуючи (4.7) вираз (4.6) має вигляд:

$$\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) = \vartheta_0(t) + (\vartheta_{\text{ФЕБ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}) \frac{I_{\beta}(t)}{I_{\text{ном}}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{ФЕБ max}}(t)}{\tau \alpha} \right); \quad (5.8)$$

Значення $\eta_{\text{ФЕБ max}}$ залежить від температури. Прийmemo, що ККД міняється за лінійним законом відповідно до рівняння:

$$\eta_{\text{ФЕБ max}}(t) = \eta_{\text{ФЕБ max су}} [1 + \alpha_P (\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) - \vartheta_{\text{су}})]; \quad (5.9)$$

де $\eta_{\text{ФЕБ max су}}$ – ККД ФЕБ в місці максимальної потужності при СУ.

Підставивши рівняння (4.9) в (4.8) отримуємо рівняння для визначення температури ФЕБ в визначений час:

$$\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) = \vartheta_0(t) + (\vartheta_{\text{ФЕБ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}) \frac{I_{\beta}(t)}{I_{\text{ном}}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{ФЕБ max су}} [1 + \alpha_P (\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) - \vartheta_{\text{су}})]}{\tau \alpha} \right); \quad (5.10)$$

Здійснивши еквівалентні перетворення у формулі (4.10) обчислюємо температуру ФЕБ у момент часу t :

$$\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) = \frac{\vartheta_0(t) + (\vartheta_{\text{ФЕБном}} - \vartheta_{0\text{ном}}) \frac{I_{\beta}(t)}{I_{\text{ном}}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{ФЕБ max CY}} (1 - \alpha_P \vartheta_{\text{CY}})}{\tau \alpha} \right)}{1 + (\vartheta_{\text{ФЕБном}} - \vartheta_{0\text{ном}}) \frac{I_{\beta}(t)}{I_{\text{ном}}} \frac{\eta_{\text{ФЕБ max CY}} \alpha_P}{\tau \alpha}}; \quad (5.11)$$

Якщо величина $\eta_{\text{ФЕБ max CY}}$ не надана в документації, то вона визначається із наступним рівнянням:

$$\eta_{\text{ФЕБ, max CY}} = \frac{P_{\text{ФЕБном}}}{F_{\text{ФЕБ}} I_{\text{CY}}}; \quad (5.12)$$

де $F_{\text{ФЕБ}}$ – це площа ФЕБ, м².

Відомо, що вихідний струм сонячної батареї безпосередньо пропорційний енергії сонячного випромінювання. Залежність між струмом сонячної батареї (I) та енергією сонячного випромінювання може бути виражена наступним чином:

$$I_{\text{ФЕУ}} = I_{\text{SCS}} \frac{G_{\alpha}}{G_{\alpha S}}; \quad (5.13)$$

де I_{SCS} – струм короткого замикання в нормальних умовах роботи, А;
 G_{α} – енергія сонячного випромінювання, яку приймає поверхня ФЕУ із врахуванням її орієнтації в просторі.

$G_{\alpha S}$ – енергія сонячного випромінювання в нормальних умовах роботи ($G_{\alpha S} = 1000$ Вт/м²).

Температурний коефіцієнт у нашому випадку має невелике значення, приблизно декілька міліампер на один градус Цельсія, для компенсації різниці температур. У зв'язку з обмеженим впливом цього поправочного

коефіцієнта в наших умовах його можна ігнорувати. Характеристики напруги-струму (ВАХ) сонячних батарей при різних рівнях енергії сонячного випромінювання представлені на рисунку 5.2.

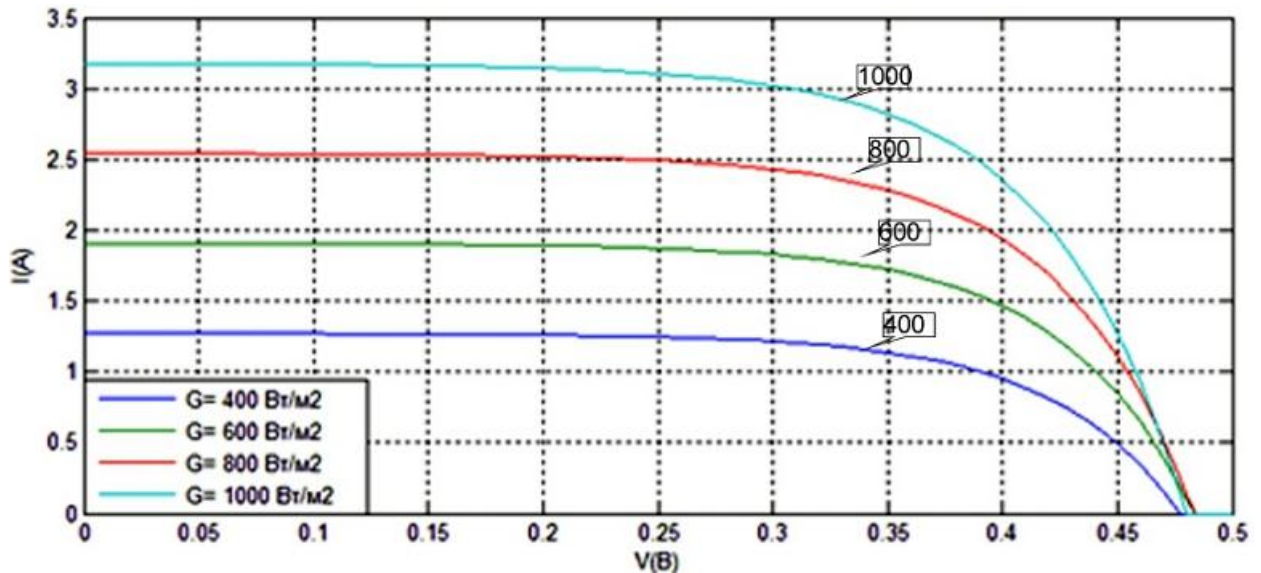


Рисунок 5.2 – Характеристики напруги і струму сонячних батарей при різних значеннях енергії сонячного випромінювання

Отже, вираз (5.13) можна використовувати як математичну модель при розробці комп'ютерних імітаційних моделей комбінованої системи електропостачання з сонячною електростанцією (СЕС).

5.2. Комп'ютерні імітаційні моделі комбінованої системи електропостачання з СЕС.

Комп'ютерна імітаційна модель комбінованої системи електропостачання з сонячною електростанцією (СЕС) складається з окремих моделей її компонентів. Принципова схема комбінованої системи електропостачання, для якої розроблено комп'ютерну імітаційну модель, представлена на рисунку 5.3.

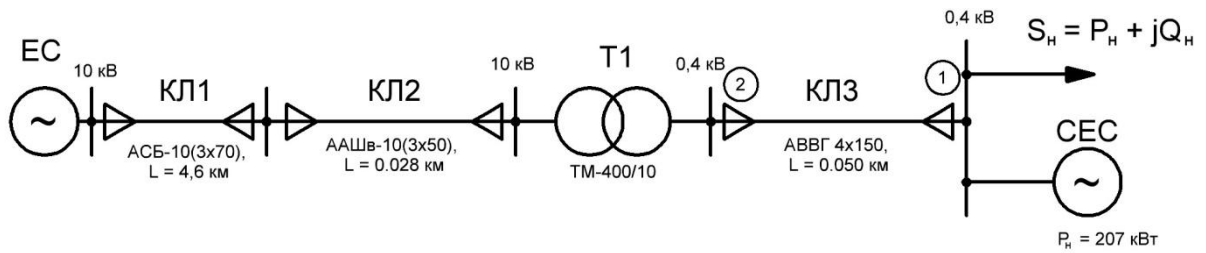


Рисунок 5.3 - Схема комбінованої системи електропостачання

Існує значна кількість програмних продуктів, призначених для розробки комп'ютерних імітаційних моделей систем електропостачання. У цьому дослідженні в якості середовища розробки комп'ютерних моделей був використаний математичний пакет прикладних програм Matlab/Simulink. Зокрема, використано комп'ютерні моделі елементів системи електропостачання, що входять до бібліотеки SimPowerSystems.

На рисунку 5.4 представлена узагальнена функціональна схема комп'ютерної моделі комбінованої системи електропостачання в середовищі Matlab/Simulink.

На рисунку 5.4 зображені:

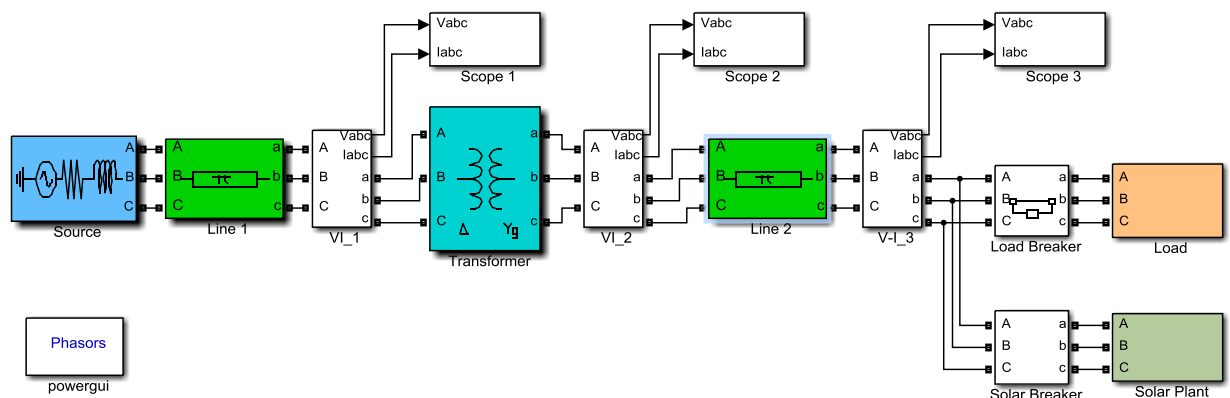
Source – блок моделі електричної системи із параметрами: $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$, $S_{\text{кз}} = 1000 \text{ МВА}$;

Line1 – блок моделі кабельних ліній $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$ КЛ1 (ААШВ-10(3x70), $L_1 = 4,61 \text{ км}$) та КЛ2 (ААШВ-10(3x50), $L_2 = 0,0278 \text{ км}$);

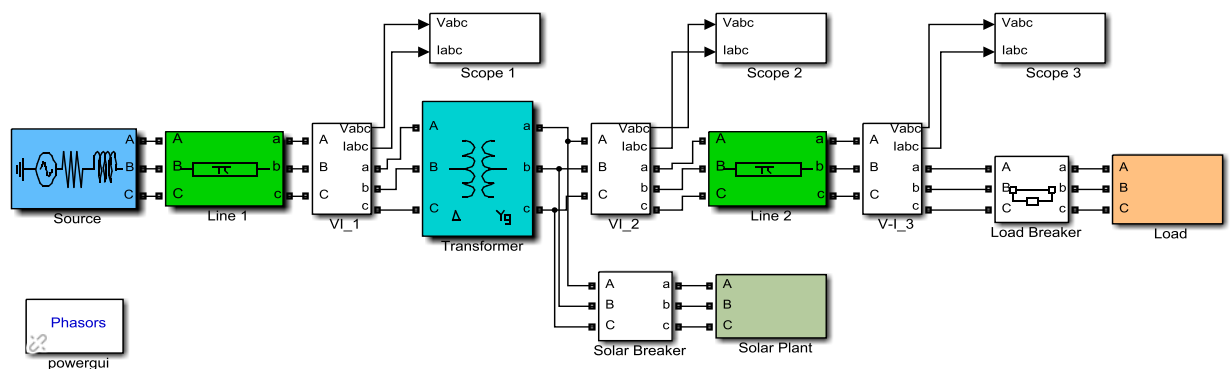
Transformer – блок моделі силового понижувального трансформатора ТМ-630/10;

Line2 – блок моделі кабельної лінії $U_{\text{ном}} = 0,38 \text{ кВ}$ (АВВГ 4x150, $L_1 = 0,051 \text{ км}$);

Load Breaker – блок моделі трифазного вимикача, що комутує струм навантаження;



а)



б)

Рисунок 5.4 - Функціональна схема Matlab/Simulink комп'ютерної моделі комбінованої системи електропостачання:

а – приєднання СЕС в точці 1 (шини 0,4 кВ)

б – приєднання СЕС в точні 2 (шини 0,4 кВ ТП 10/0,4 кВ)

Solar Breaker – блок моделі трифазного вимикача, який комутує струм СЕС;

Load – блок, який моделює графік навантаження;

Solar Plant – блок моделі СЕС, відповідно виразу (5.13) та графіки енергетичного випромінювання;

VI1, VI_2, VI_3 – модель трифазних вимірювачів струму і напруги.

Scope 1, Scope 2, Scope 3 – блоки, які містять засоби вимірювання потужності і візуалізації результатів моделювання.

5.3. Комп'ютерне моделювання режимів роботи комбінованої системи електропостачання з ВДЕ.

Розроблена імітаційна модель, зазначена у розділі 5.2, дозволяє аналізувати режими роботи комбінованої системи електропостачання з використанням відновлювальних джерел енергії. Ця модель також надає можливість визначити напругу у вузлах схеми та втрати в елементах електричних мереж. Таким чином, за її допомогою можна перевірити правильність результатів теоретичних досліджень.

Аналіз режимів роботи комбінованої системи електропостачання з використанням відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) за допомогою комп'ютерного імітаційного моделювання включав в себе наступні основні завдання:

- Визначення впливу ВДЕ на рівень напруги для різних варіантів з'єднання сонячних електростанцій (СЕС) з електричною мережею.
- Аналіз рівня втрат потужності в елементах системи електропостачання для різних сценаріїв приєднання відновлювальних джерел енергії до мережі.

Після аналізу принципової схеми комбінованої системи електропостачання можна прийти до висновку, що існують два можливих варіанти приєднання сонячних електростанцій (СЕС): вузол 1 (пряме приєднання до шин 0,4 кВ цеху) та вузол 2 (приєднання до шин знижувальної трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ). Важливо враховувати, що другий варіант можливий лише за умови, що лінія Л2 перебуває в балансі підприємства і відсутні технічні чи організаційні перешкоди, що можуть ускладнити таке приєднання СЕС.

На рисунках 5.5–5.20 представлені результати комп'ютерного імітаційного моделювання параметрів режиму комбінованої системи електропостачання для різних сценаріїв приєднання сонячних електростанцій (СЕС) до електричної мережі.

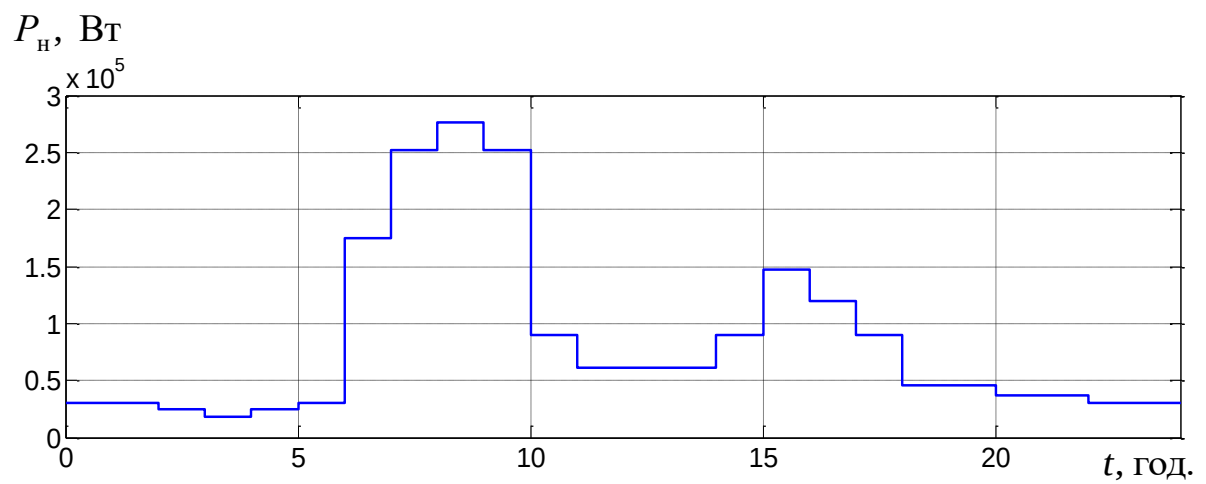


Рисунок 5.5 - Добовий графік активного навантаження P_n

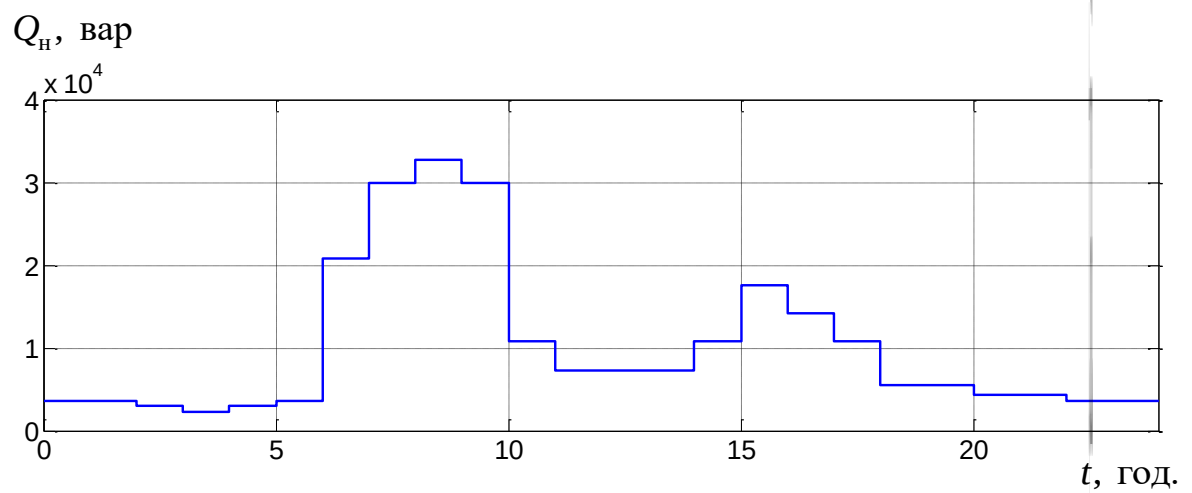


Рисунок 5.6 - Добовий графік реактивного навантаження Q_n

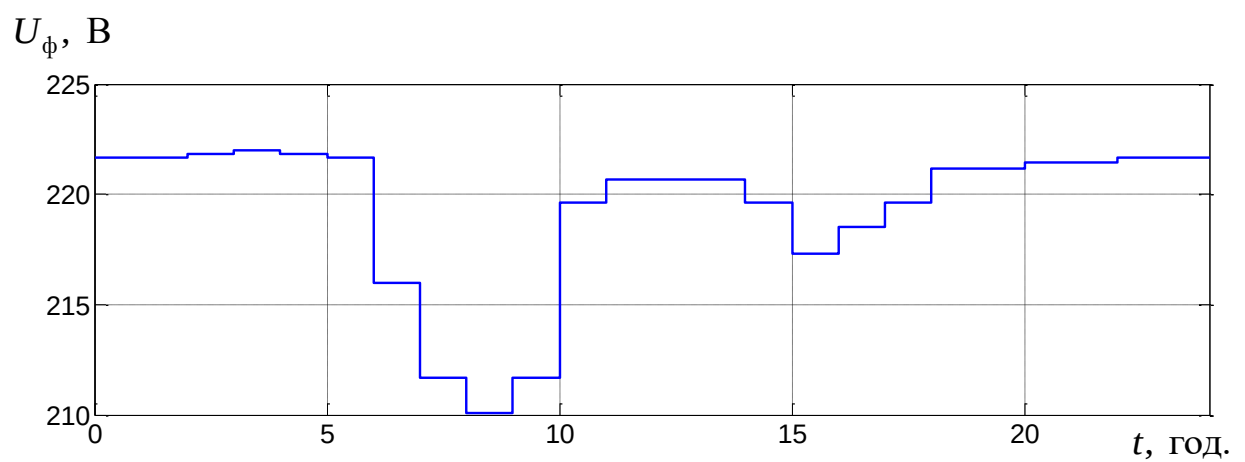


Рисунок 5.7 - Графік діючого значення фазної напруги U_ϕ в точці 1 при відсутності ВДЕ

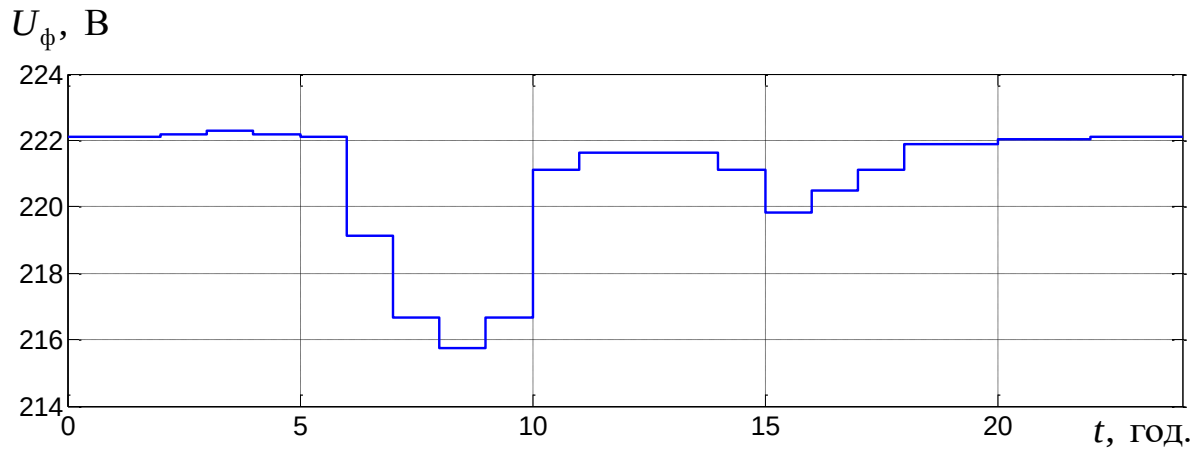


Рисунок 5.8 - Графік діючого значення фазної напруги U_ϕ в точці 2 схеми при відсутності ВДЕ

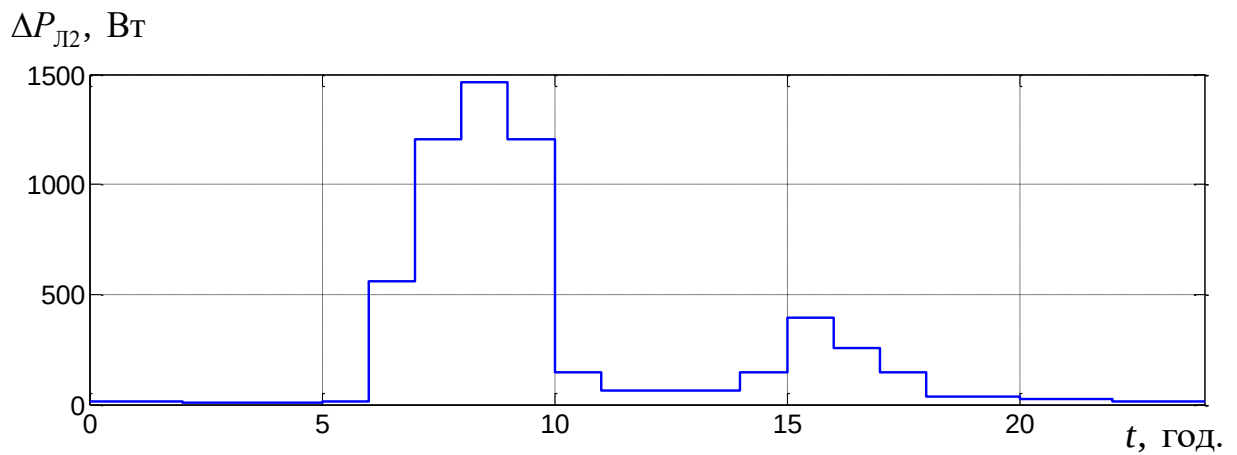


Рисунок 5.9 - Графік втрат потужності в лінії Л2 $\Delta P_{Л2}$ при відсутності ВДЕ

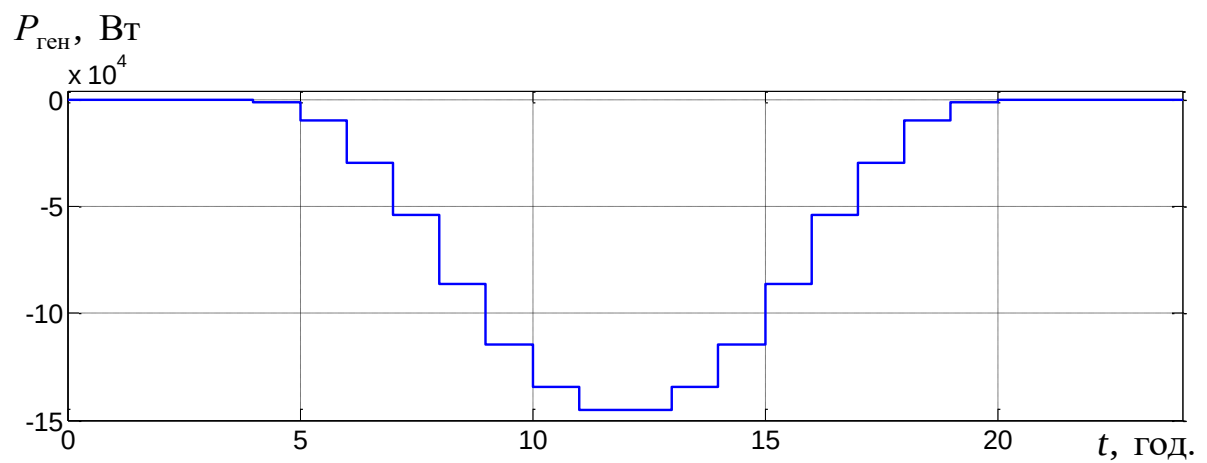


Рисунок 5.10 - Графік генерації активної потужності СЕС, $P_{ген}$

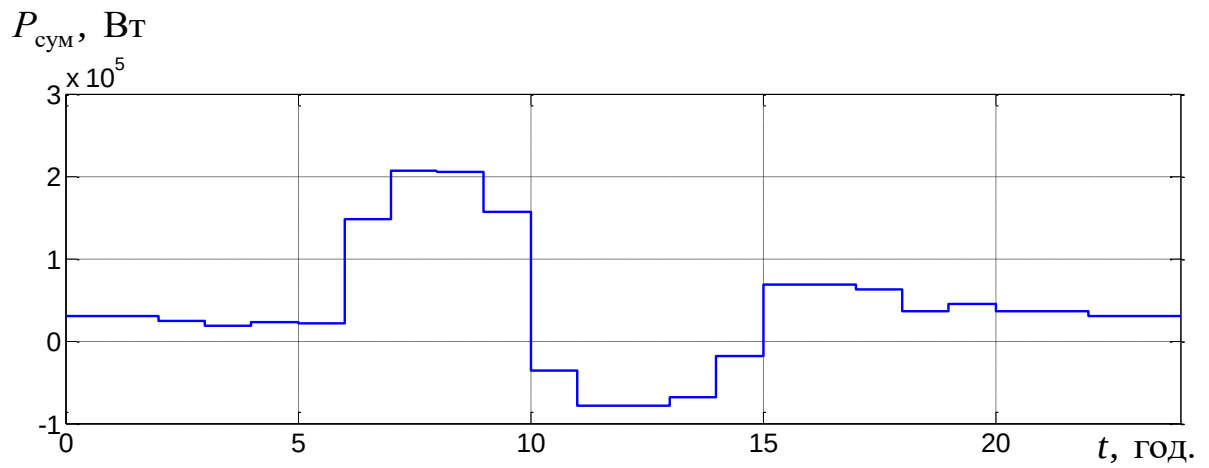


Рисунок 5.11 - Загальний графік споживання активної потужності навантаження і генерації активної потужності СЕС, $P_{\text{сум}}$

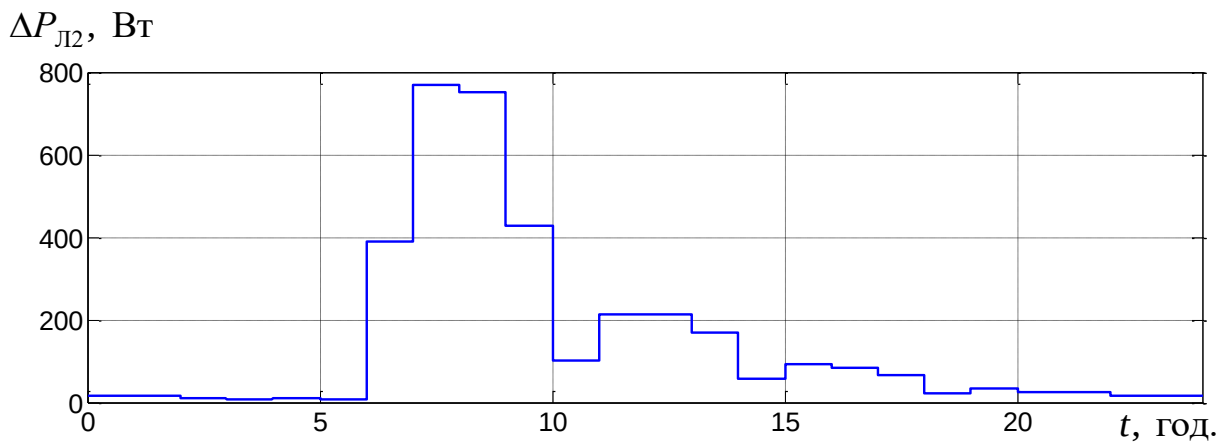


Рисунок 5.12 - Графік втрат потужності в лінії Л2 $\Delta P_{\text{Л2}}$ при підключенні ВДЕ в точку 1 (шини 0,4 кВ с/г підприємства)

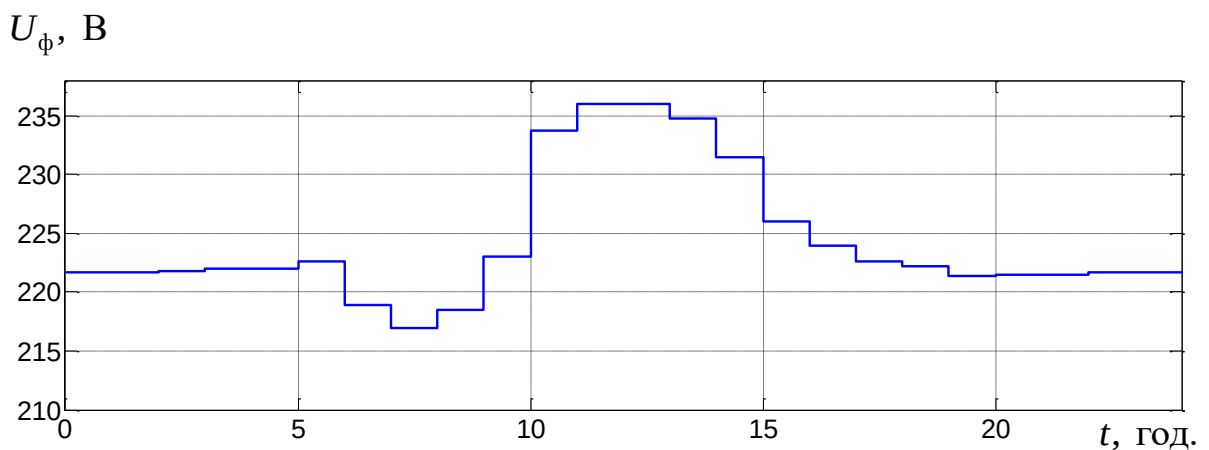


Рисунок 5.13 - Графік діючого значення фазної напруги U_{ϕ} в точці 1 при підключенні ВДЕ в точку 1 (шини 0,4 кВ с/г підприємства)

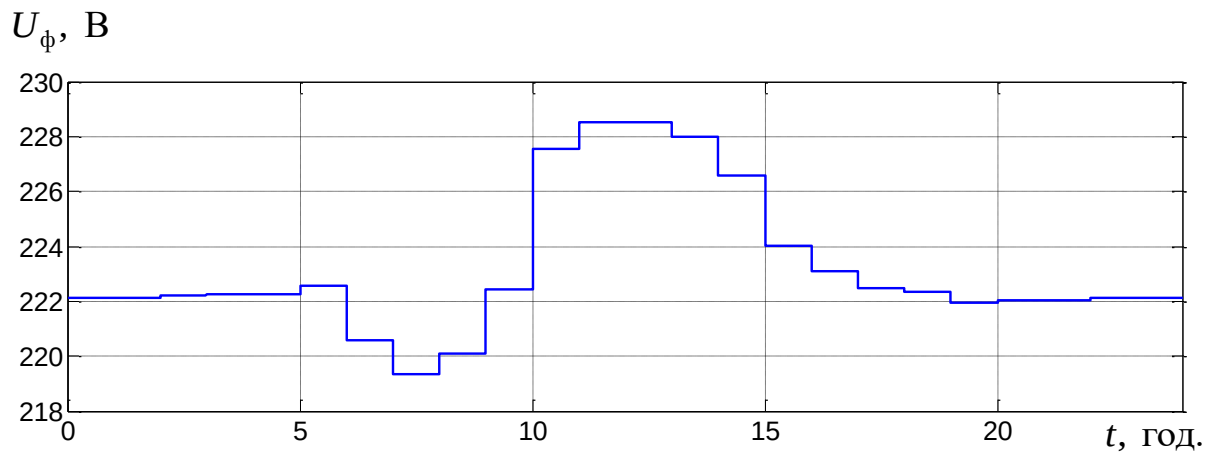


Рисунок 5.14 - Графік діючого значення фазної напруги U_ϕ в точці 2 при підключенні ВДЕ в точку 1 (шини 0,4 кВ с/г підприємства)

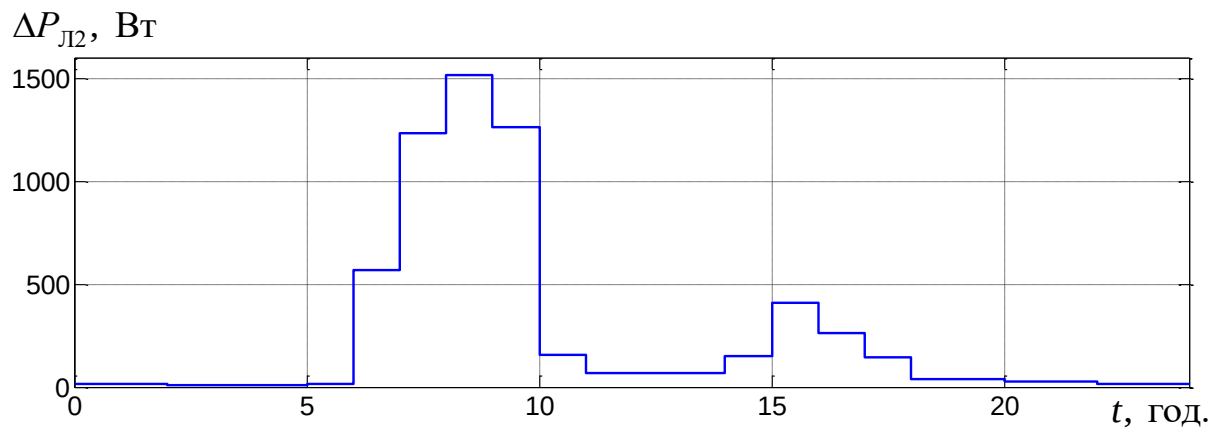


Рисунок 5.15 - Графік втрат потужності в лінії Л2 $\Delta P_{Л2}$ при підключенні ВДЕ в точку 2 (шини 0,4 кВ ТП 10/04 кВ)

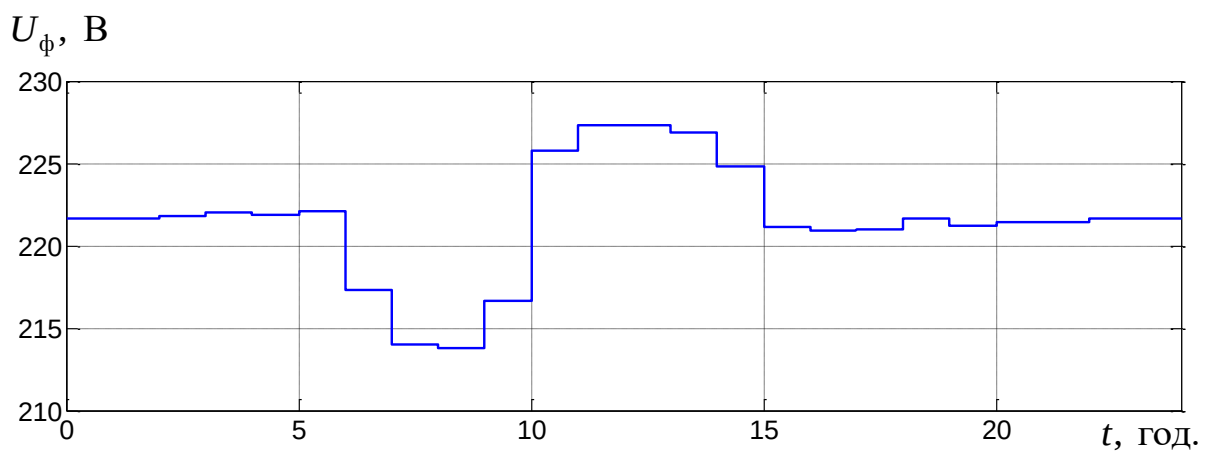


Рисунок 5.16 - Графік діючого значення фазної напруги U_ϕ в точці 1 при підключенні ВДЕ в точку 2 (шини 0,4 кВ ТП 10/04 кВ)

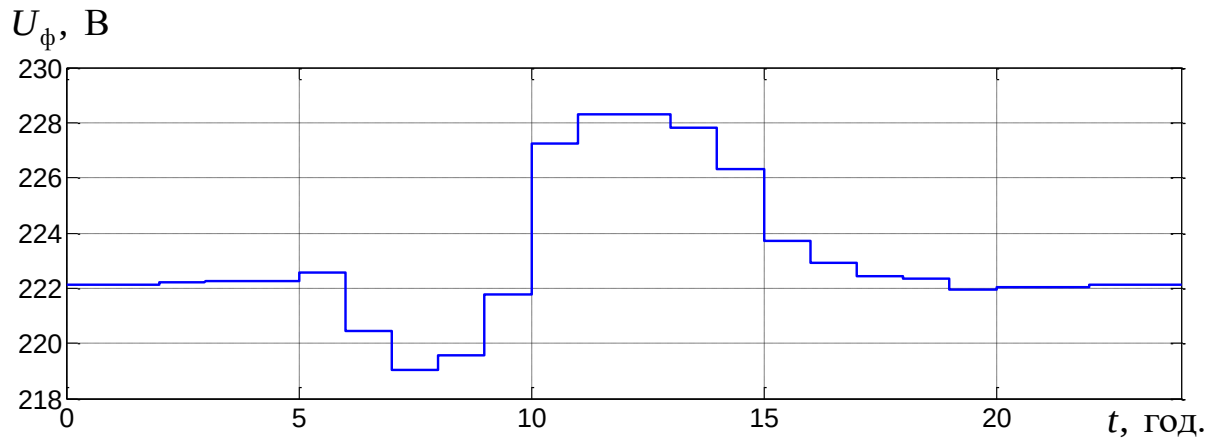


Рисунок 5.17 - Графік діючого значення фазної напруги U_ϕ в точці 2 при підключенні ВДЕ в точку 2 (шини 0,4 кВ ТП 10/04 кВ)

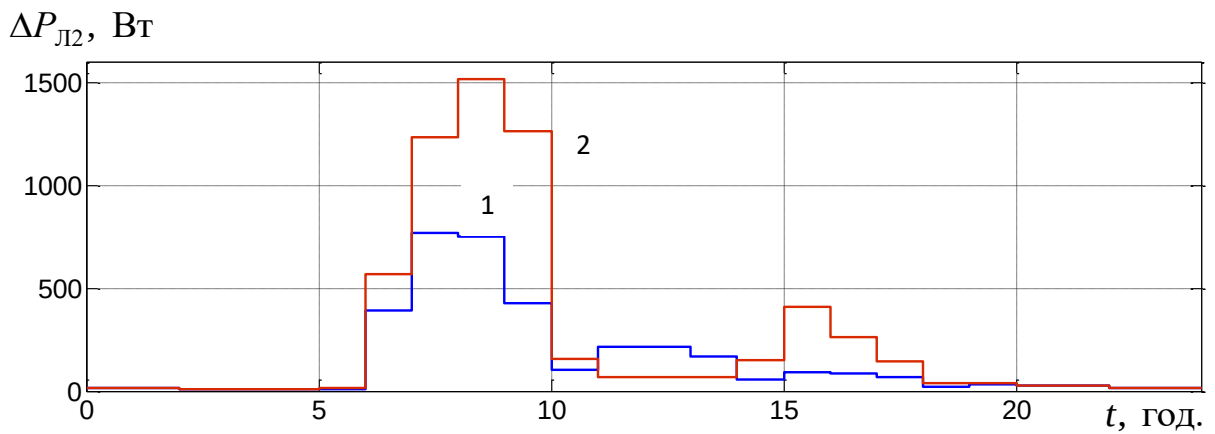


Рисунок 5.18 - Графік втрат потужності в лінії Л2 $\Delta P_{Л2}$ при підключенні ВДЕ в точку 1 (крива 1) і в точку 2 (крива 2) (шини 0,4 кВ ТП 10/04 кВ)

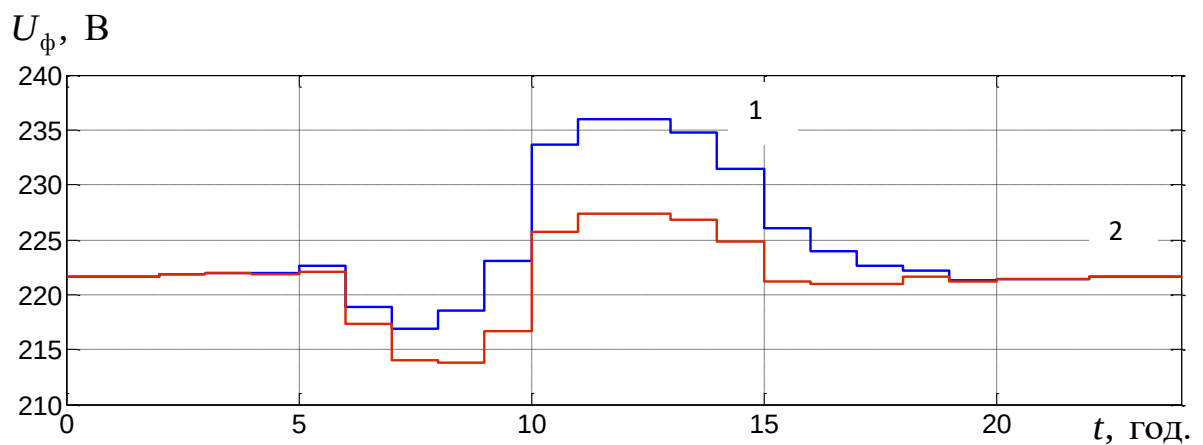


Рисунок 5.19 - Графік діючого значення фазної напруги U_ϕ в точці 1 при підключенні ВДЕ в точку 1 (графік 1) та в точку 2 (графік 2)

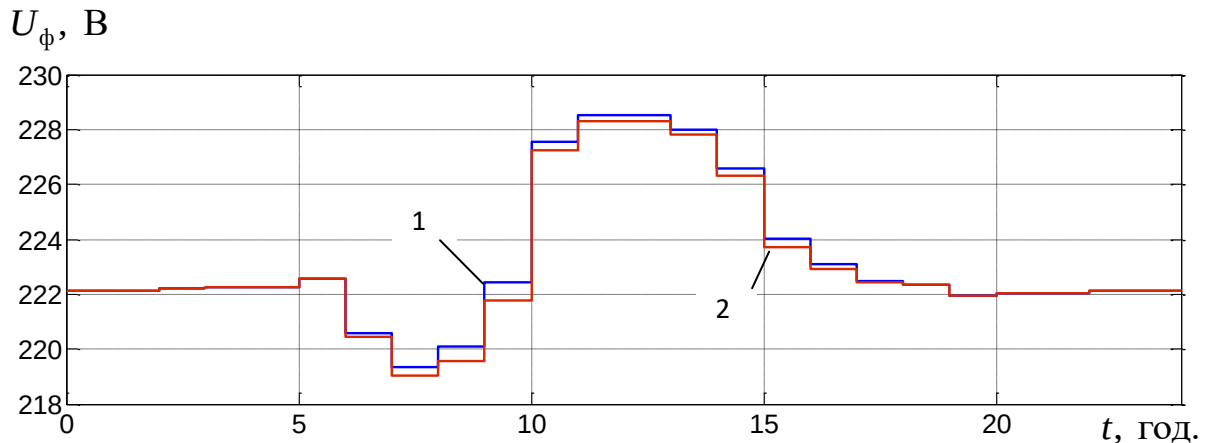


Рисунок 5.20 - Графік діючого значення фазної напруги U_{ϕ} в точці 2 при підключенні ВДЕ в точку 1 (графік 1) та в точку 2 (графік 2) (шини 0,4 кВ ТП 10/04 кВ)

Статистична обробка результатів напруг в точках 1 і 2 схеми при підключенні сонячних електростанцій (СЕС) показала, що при приєднанні СЕС до точки 1 в певний період відбувалися значущі відхилення напруги, що призводили до понаднормових значень, і в результаті цього, якість електричної енергії, враховуючи показник усталеного відхилення напруги (інтегральна ймовірність $P(\Delta U_{\phi}) = 79,2\% < 95\%$), була незадовільною. У випадку приєднання СЕС до точки 2 схеми (шини 0,4 кВ ТП 10/0,4 кВ), значення усталеного відхилення напруги відповідали вимогам ДЕСТ 13109-97.

Однак, при підключенні сонячних електростанцій (СЕС) до точки 2 схеми (шини 0,4 кВ ТП 10/0,4 кВ), втрати електричної енергії в лінії ЛВ виявились на 42% вищими.

З цього випливає, що хоча точка 1 схеми (шини 0,4 кВ цеху) є оптимальним місцем для приєднання СЕС, необхідно вживати заходів для нормалізації режиму напруги в цьому варіанті.

6 РОЗРАХУНОК ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОЗРОБЛЕНОЇ КОМПЛЕКСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

6.1. Визначення кошторисної вартості схеми з автономним електропостачанням

Використання енергії відновлюваних джерел (ВДЕ) стає все більш актуальним як альтернатива традиційним енергоносіям. Невичерпність і екологічна чистота ВДЕ, зменшення шкідливих викидів і збереження енергоресурсів для майбутніх поколінь роблять їх привабливими. Це призвело до стрімкого розвитку відновлюваної енергетики, яка стає конкурентоздатною галуззю енергетики.

Наприклад, розташування атомних електростанцій у розвинених промислових регіонах стає серйозною проблемою. Аварії на таких електростанціях часто мають катастрофічні наслідки, і навіть у робочому режимі вони потребують значні площі відчуження. Це призводить до втрати земель, які не можуть бути використані для інших цілей.

Важливість розвитку альтернативної енергетики стає очевидною, оскільки вона грає ключову роль у зменшенні викидів парникових газів, зниженні негативного впливу на довкілля, підвищенні безпеки енергопостачання та зменшенні залежності від імпорту енергії. Україна стикається з дефіцитом дешевих джерел копалинного палива, і замість них використовуються родовища із складними геологічними умовами. Це призводить до збільшення загальних витрат, що в свою чергу підвищує оптові ціни на ці види палива та спричиняє зростання цін на електроенергію та електрообладнання.

Міністерство палива та енергетики України розробило Комплексну енергетичну стратегію з метою стабілізації енергоринку країни та зменшення його залежності від імпорту енергоносіїв. Ця стратегія передбачає досягнення ефекту економії паливних енергоресурсів через широке

впровадження автономних джерел живлення для малих та середніх енергоспоживачів.

Розглянемо приклад електропостачання невеликого сільськогосподарського об'єкту в Кіровоградській області. Цей об'єкт розташований в сільській місцевості, і відстань до звичайної мережі електропостачання становить 18 км.

Для забезпечення електропостачання рекомендується встановлення наступного обладнання: сонячних монокристалічних електричних панелей, акумуляторних батарей та інвертора-випрямляча. Перетворювач (конвертор) розглядається як загальний пристрій для перетворення постійного струму, що генерується сонячною батареєю, у змінний струм. Також вважається, що він може працювати в обох напрямках, перетворюючи змінний струм в постійний для заряду батареї. Як альтернативу електропостачання розглядається можливість будівництва лінії електропередачі.

Визначимо техніко-економічні показники для варіанту живлення від автономних джерел:

— капіталовкладення на обладнання:

$$K = K_{\text{Trina}} + K_{\text{Sunny Tripower}} + K_{\text{щз}} + K_{\text{щп}} + K_{\text{ліч}} + K_{\text{мо}} + K_{\text{мк}} = 218410 + 47188 + 7500 + 4200 + 9500 + 26000 + 18120 = 330918 \text{ грн}$$

- обчислюємо щорічні амортизаційні відрахування:

$$C_a = \varphi_a \cdot K = 0,08 \cdot 330918 = 26473,44 \text{ грн/рік}$$

де φ_a – коефіцієнт, використовується для амортизаційних відрахувань $\varphi_a = 8\%$

- обчислюємо експлуатаційні витрати:

$$C_e = C_a + C_n = 26473,44 \text{ грн/рік}$$

- обчислюємо річні приведені витрати по даному варіанту:

$$Z = 0,12 \cdot K + C_e = 0,12 \cdot 330918 + 26473,44 = 66183,6 \text{ грн.}$$

Таблиця 6.2 - Техніко-економічні показники електропостачання з автономним джерелом

№ п/п	Найменування обладнання	Одиниця вимірювання	Кількість	Ціна одиниці, грн.	Всього, грн.
1	Фотоелектричні модулі TRINA SOLAR 260P	шт	40	5460	218410
2	Інвертор Sunny Tripower 15000TL	кВт встановленої потужності	1	47188	47188
3	Щит розподільчий (змінний струм)	Шт.	1	7500	7500
4	Щит розподільчий (постійний струм)	Шт.	1	4200	4200
5	Двохтарифний лічильник Gama 300 та модем	Шт.	1	9500	9500
6	Мережеве обладнання				26000
7	Трекери та монтажні конструкції				18120
	Всього	-	-	-	330918

6.2. Визначення кошторисної вартості варіанту із спорудженням лінії електропередачі.

Електричне навантаження об'єкту оцінюється на рівні $P = 11$ кВт та $S = 13,5$ кВа. Відстань від районної підстанції до приймального пункту складає $L = 18$ км. Підприємство взагалі є споживачем електроенергії 3-ї категорії надійності електропостачання.

Врахуємо, що підприємство належить до споживачів 3-ї категорії надійності електропостачання, тому для його живлення необхідно використовувати лише одну лінію ($n=1$).

Проведемо вибір економічно доцільного перерізу проводів для лінії напругою $U_n = 10$ кВ.

Визначаємо розрахунковий струм лінії:

$$I_p = S / (n \cdot \sqrt{3} \cdot U_n) = 13,5 / (1 \cdot \sqrt{3} \cdot 11) = 0,71 \text{ А.}$$

Для електропостачання підприємства ми вибираємо повітряну лінію, розташовану на залізобетонних опорах із сталевалюмінієвими проводами марки АС. Далі знаходимо основні параметри, такі як допустимий струм ($I_{\text{доп}}$), втрати потужності при номінальному навантаженні (ΔP_n) та капіталовкладення в 1 км лінії (K_o).

Провід АС-35; $\Delta P_n = 88$ кВт/км; $I_{\text{доп}} = 175$ А; $K_o = 31000$ тис.грн/км

Обчислюємо приведені витрати для проводу АС-35:

$$K_z = I_p / I_{\text{доп}} = 0,71 / 175 = 0,004;$$

$$\Delta P_d = \Delta P_n \cdot K_z^2 \cdot L = 88 \cdot 0,004^2 \cdot 18 = 25,3 \text{ кВт};$$

$$\tau = (0,124 + T_{\text{мак}} \cdot 10^{-4})^2 \cdot T_p = (0,124 + 4400 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760 = 2786 \text{ год},$$

де $T_{\text{мак}} = 4400$ год:

$$W_a = \Delta P_d \cdot \tau = 25,3 \cdot 2786 = 70498,9 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$C_n = W_a \cdot C_o = 70498 \cdot 2,4 = 169197,5 \text{ грн};$$

$$K = K_o \cdot L = 31000 \cdot 18 = 558000 \text{ грн};$$

$$C_a = \phi_a \cdot K = 0,028 \cdot 558000 = 15624 \text{ грн};$$

$$C_e = C_a + C_n = 15624 + 169197,5 = 184821,5 \text{ грн};$$

Приймаємо до встановлення трансформатор ТМ-16 вартістю 57000 грн.

Обчислюємо сумарні капіталовкладення:

Таблиця 6.2 Розрахунок капіталовкладень варіанту живлення від мережі

№ п/п	Найменування обладнання	Одиниця вимірювання	Кількість	Ціна одиниці, грн.	Всього, грн.
1	Комірка РП 35/10	шт.	1	52000	52000
2	Повітряна лінія 10 кВ АС-35	км.	18	31000	558000
3	Трансформатор ТМ-16	шт.	1	57000	57000
	Вартість робіт по побудові ПЛ	грн/км.	18	5000	90000
	Всього	-	-	-	757000

$$Z = 0,12 \cdot K_{\Sigma} + C_e = 0,12 \cdot 757000 + 184821,5 = 275661,5 \text{ грн}.$$

Результати розрахунків зведемо в таблицю 6.3 для порівняння.

Таблиця 6.3 Порівняння техніко-економічних показників варіантів електропостачання

Варіант	К, грн	Ca, грн	Се, грн	З, грн/рік
з автономним живленням	330918	26473,44	26473,44	66183,6
зі спорудженням лінії електропередачі	757000	15624	184821,5	275661,5

Варіант із автономним енергопостачанням вимагає значно менших капіталовкладень, ніж побудова повітряної лінії. Проте, він супроводжується значним збільшенням експлуатаційних витрат та амортизаційних відрахувань. Враховуючи сучасні тенденції зростання цін на вичерпні енергоносії, оскільки неможливо гарантувати стабільні ціни на енергоринку, варіант із автономним живленням, що є повністю незалежним від мережі та енергоринку, виявиться більш вигідним, ніж будівництво лінії.

При врахуванні екологічних та соціальних аспектів варіант з живленням від відновлюваних джерел енергії виявляється надзвичайно вигідним з наступних причин:

- Не забруднює оточуюче середовище, а також сприяє зниженню викидів в атмосферу, завдяки зменшенню навантаження на енергетичну мережу і, відповідно, обсягу спалювання енергоносіїв.
- Потребує значно менших площ для забудови, що дозволяє уникнути виведення родючої землі з аграрного використання (наприклад, сонячні панелі можна встановлювати на дахах будівель).
- Зменшує залежність країни від імпорту енергоносіїв.

Отже, для невеликих та середніх споживачів енергії, розташованих на значній відстані від звичайної мережі, рекомендується використовувати варіант із автономним живленням. Цей варіант вимагає значно менших капіталовкладень і має ряд переваг, що в перспективі дозволить досягти значно вищої ефективності, ніж при використанні варіанта живлення від електромережі.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ

7.1. Нормативні документи щодо охорони праці під час використання сонячних батарей.

Останнім часом у багатьох країнах Європи стало поширеним використання альтернативних джерел енергії для вирішення господарських потреб. В Україні на сьогоднішній день відсутнє спеціальне законодавство, що регулює використання сонячних батарей. Зазначимо, що виробники сучасних екопристроїв вже визначилися щодо цього питання, рекомендуючи розглядати свої вироби як звичайні побутові електроприлади, що автоматично виключає потребу у будь-яких спеціальних дозволах.

Відповідно до положень статті 11 Закону України "Про альтернативні джерела енергії" [2], експлуатація альтернативних джерел енергії на об'єктах альтернативної енергетики вимагає виконання таких умов:

1. Забезпечення безпечного виконання робіт та здійснення державного нагляду за режимами споживання енергії.
2. Забезпечення енергетичної безпеки для технічного та економічного задоволення періодичних, поточних і перспективних потреб споживачів енергії.
3. Виконання технологічних вимог щодо виробництва, акумулювання, передачі, постачання та споживання енергії.
4. Дотримання єдиної державної нормативної бази, правил і стандартів всіма суб'єктами відносин.
5. Виконання правил експлуатації об'єктів альтернативної енергетики, які регулюються нормативно-правовими актами та є обов'язковими для всіх суб'єктів підприємницької діяльності.

Згідно із статтею 12 Закону України "Про використання альтернативних джерел енергії", заходи щодо забезпечення безпеки та

екологічної стійкості при використанні альтернативних джерел енергії включають наступні аспекти:

1. Уникання аварійних ситуацій та подальше усунення їх наслідків на об'єктах альтернативної енергетики через дотримання встановлених державних стандартів.

2. Створення умов розвитку, зростання технічного рівня, безпечної експлуатації і охорони об'єктів альтернативної енергетики відповідно до чинного законодавства.

3. Забезпечення необхідного балансу потужності і якості енергії, що вироблена з альтернативних джерел, для надійної і безаварійної роботи разом із загальною енергетичною системою України.

4. Проведення контролю за впровадженням нових систем протиаварійної автоматики з метою захисту об'єктів альтернативної енергетики, а також приладів зв'язку і систем диспетчерського (оперативно-технологічного) управління енергетичними мережами України.

5. Організація нагляду за експлуатацією систем протиаварійної автоматики та захисту об'єктів альтернативної енергетики для запобігання несанкціонованого втручання.

Державний нагляд у галузі альтернативних джерел енергії виконується спеціально уповноваженим центральним органом виконавчої влади у відповідній сфері та іншими органами в порядку, встановленому Кабінетом Міністрів України [2]. Щодо сонячних батарей, для того щоб система з сонячних батарей працювала і постачала енергію у мережу, необхідно встановити ряд додаткових електроприладів, включаючи інвертор, що перетворює постійний струм у змінний, акумуляторну батарею для накопичення енергії, та контролер заряду акумулятора [13].

Оскільки надійність роботи системи невіддільно пов'язана із ступенем зарядженості свинцевокислотних акумуляторів, необхідно керуватись "Інструкцією з охорони праці при експлуатації стаціонарних свинцево-

кислотних акумуляторних батарей". Оскільки до системи з сонячних батарей входять різні електроприлади (інвертор, контролер), слід дотримуватись всіх заходів та системи засобів безпечної експлуатації електроустановок. Забезпечення ізоляції струмовідвідних частин здійснюється за допомогою покриття їх діелектричним шаром, яке захищає людину від можливого контакту з елементами електроустановок, через які протікає електричний струм.

За електрозахисні засоби вважаються вироби, які можна переносити та переміщувати, і призначені для захисту працівників, які працюють з електроустановками, від можливого ураження електричним струмом, впливу електричної дуги та електромагнітного поля [14].

Виділяють основні та додаткові ізолюючі електрозахисні засоби. До основних належать ті, чия ізоляція може витримати робочу напругу електроустановки до 1000 В протягом тривалого періоду – такі як діелектричні рукавички, ізольовані штанги, інструменти із ізольованими ручками, електровимірювальні кліщі, ізольовані кліщі та покажчики напруги. При роботі в електроустановках з напругою понад 1000 В використовують ізольовані штанги, струмовимірювальні та ізольовані кліщі, покажчики напруги для фазування.

Додаткові захисні ізолюючі засоби мають обмежені ізолюючі властивості і призначені виключно для посилення захисного ефекту основних засобів, з якими вони застосовуються.

Серед них вказуються:

- для робіт в електроустановках з напругою до 1000 В - діелектричні калоші, килимки, ізолювальні підставки;
- для робіт в електроустановках з напругою понад 1000 В - діелектричні рукавички, боти, килимки, ізолювальні підставки [14].

Захисні електрозасоби, такі як щити, ширми, екрани та плакати електробезпеки, служать для захисту працівників, які здійснюють роботи в

електроустановках, від випадкового доторкання чи наближення до струмовідних частин, що перебувають під напругою. Такі огорожувальні засоби є важливою складовою системи безпеки при роботі з електрообладнанням. В контексті використання сонячних батарей дотримання нормативно-правових вимог, таких як Закон України "Про використання альтернативних джерел енергії", а також інструкцій та основ охорони праці, є обов'язковим для забезпечення безпеки працівників.

7.2. Вимоги безпеки при використанні сонячних батарей.

Системи фотогальваніки збирають енергію сонячного світла та перетворюють її на постійний струм. Можна використовувати електрохімічні сонячні батареї для зберігання енергії або підключити їх до домашньої електромережі. Проте, при встановленні, експлуатації та обслуговуванні таких систем, важливо дотримуватися заходів безпеки. Це не лише запобігає травмам та загрозам для здоров'я, але й забезпечує ефективне функціонування сонячних панелей та батарей.

Безпека має велике значення як при підключенні сонячних панелей одну до одної, так і при встановленні монтажного каркасу. Недостатня увага може призвести до випадків падінь з висоти, травмування пальців чи пошкодження конструкційних елементів. Тому важливо дотримуватися всіх правил та заходів безпеки під час робіт із сонячними енергосистемами, включаючи використання відповідного захисту від падінь та безпечних методів роботи з обладнанням.

7.3. Робоче місце та його ризики.

Перед встановленням сонячної енергосистеми фахівці здійснюють візит на об'єкт для детальної оцінки. Під час цього візиту вони виконують ряд дій, зокрема:

- Вибір інструментів для аналізу об'єкта, що є відповідними та ефективними.
- Визначення оптимального розташування сонячних панелей, інверторів, сонячних батарей та інших компонентів для досягнення найкращого балансу.
- Пошук відповідного місця з належною орієнтацією, доступом до достатнього сонячного світла та достатньою площею для встановлення, перевірка структурної цілісності.
- Виявлення потенційних небезпек на об'єкті.
- Розробка плану будівельного майданчика з урахуванням розташування існуючих будівель та обладнання.
- Вимірювання сонячного випромінювання та середньої температури для оцінки потенційної продуктивності системи.
- Кількісне визначення електроенергетичних потреб будинку, включаючи аналіз рахунків за комунальні послуги, вимірювання лічильників та спілкування з власником.

Детальний план робочого місця дозволяє вирішувати проблеми ще до їх виникнення. Все необхідне обладнання повинно бути підготовлене та перевірене, щоб забезпечити його працездатність і функціональність перед переміщенням на робочий майданчик.

7.4. Сходи та їх безпека.

Одним з найбільш звичних місць для встановлення сонячних батарей є дах. У цьому випадку сходи є обов'язковою складовою для доступу до робочого майданчика. Інсталятор повинен ретельно вибрати найкращі моделі для виконання своєї роботи, дотримуючись основних правил безпеки:

- Достатня довжина. Сходи повинні виступати не менше 90 см над тією сходинкою, на якій стоїть робітник. Це вимога застосовується до різних типів сходів, включаючи ступінчасті, прямі або розсувні. Інсталятор повинен врахувати це під час оцінки об'єкта.

- Вибір розміщення. Розміщення сходів припускається лише на сухій та стійкій поверхні, яка не блокує доступ до дверей, проходів або ліній електропередач.

- Вибір матеріалів. Сходи часто виготовляють з алюмінію чи металу, але вони можуть бути небезпечними в енергетичних об'єктах поруч із лініями електропередач. Тому рекомендується використовувати сходи з непровідних матеріалів.

На сьогоднішній день найбільш поширеними є сходи з алюмінію чи металу. Проте, важливо зауважити, що ці матеріали можуть становити певний ризик при роботі на енергетичних об'єктах та поруч із лініями електропередач. Отже, рекомендується розглядати використання сходів, виготовлених з непровідних матеріалів для підвищення безпеки.

7.5. Рекомендації щодо поводження з сонячними панелями.

Піднесення та встановлення сонячних панелей та батарей може бути складним та потенційно небезпечним завданням для робітників. При завантаженні та монтажі цих великих обладнань з вантажівок на будмайданчику можуть виникати різні травми, такі як вивихи, розтягнення м'язів і навіть переломи. Треба вживати заходів безпеки та використовувати спеціалізоване обладнання для мінімізації ризиків та забезпечення безпеки працівників.

Потрібно враховувати, що при здобутті сонячного світла панелі можуть стати гарячими, що може викликати опіки. Тому важливо дотримуватися таких правил безпеки при роботі з панелями:

- Усі операції з панелями слід виконувати як мінімум удвох, щоб уникнути можливих травм та пошкоджень.

- Не слід використовувати сходи для переміщення сонячних батарей; краще використовувати кран, підйомник або систему лебідок.

- Сонячні панелі слід обгортати непрозорим папером, щоб уникнути перегріву та опіків під час їхнього використання.
- Використовуйте відповідне обладнання для захисту, таке як захисні каски, рукавички та взуття з нековзним покриттям.

Також рекомендується наносити сонцезахисний крем перед встановленням для запобігання опікам від сонячного випромінювання на шкірі.

7.6. Запобігання падінню з висоти.

Під час робіт на висоті, таких як встановлення сонячних панелей, важливо пам'ятати про можливість падіння з висоти. Небезпека існує не лише на даху, а й на сходах чи в інших місцях на будівельному майданчику. Робота на висоті може бути особливо ризикованою через обмежений простір під час установки сонячних панелей.

Для уникнення нещасних випадків важливо перед виконанням робіт вивчити майбутнє робоче місце. Необхідно усунути будь-які перешкоди на даху і тимчасово закрити будь-які отвори на покрівлі чи робочому майданчику на рівні землею.

При виконанні робіт на висоті, якщо висота перевищує півтора метра, необхідно дотримуватись вимог безпеки. Робочий майданчик повинен бути обладнаний огорожами по всіх його краях. Співробітники повинні використовувати страхові ремені безпеки та закладати захисні сітки вздовж периметру робочого майданчика.

7.7. Електрична безпека.

Сонячні електричні системи складаються з різних компонентів, які, коли знаходяться під напругою, можуть становити ризик ураження електричним струмом, опіків та інших травм. Для запобігання цим небезпекам робітники повинні використовувати непрозорі матеріали для закриття панелей після розпакування. Також важливо дотримуватися

запобіжних заходів під час підключення фотоелектричних сонячних батарей, таких як відключення об'єкта від електромережі, перевірка відсутності напруги та уникання роботи з системою під навантаженням.

Так, дотримання інструкцій з безпеки використання сонячної енергії є важливим кроком для захисту установників від травм та інших небезпек. Строга відповідність стандартам та правилам техніки безпеки, а також дотримання керівництва виробника, забезпечує безпечні умови праці для спеціалістів.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційному дослідженні розглянуті переваги, труднощі та перспективи використання технологій вітрової та сонячної енергетики в агропромисловому комплексі України. Аналізуючи досвід високорозвинених країн у використанні альтернативних джерел енергії, виявлено екологічну та економічну доцільність створення автономної системи електрогенерації на основі неперервного постачання енергії від сонця та вітру. Також обґрунтовано технічні та технологічні можливості розробки такої системи, за умови забезпечення її стабільності під час експлуатації.

Підприємства агропромислового комплексу України можуть найбільш ефективно використовувати "гнучку" автономну мережу електропостачання разом із потужностями об'єднаної енергетичної системи. Ця мережа, залежно від енергетичних потреб підприємства, може включати в себе вертикальні вітрогенератори, сонячні панелі та гребеневі аеродинамічні силові генератори, розташовані на дахах будівель та інших споруд. Додатково, система включає в себе систему акумуляування енергії на базі літій-іонних батарей та систему контролю та диспетчеризації роботи автономної мережі. Ця диверсифікація джерел електроенергії сприяє зменшенню рівня енергетичної залежності сільськогосподарського виробництва і є фактором підвищення конкурентоспроможності виробленої продукції на ринках, зменшуючи витрати на виробництво.

У цьому дослідженні використовуються методи розрахунків енергопотенціалів, зокрема використовується як приклад програмне забезпечення NASA. Ці методи можуть служити основою для розробки програмного забезпечення для проектування систем автономного живлення.

Виявлено, що центральний та південний регіони України мають достатній потенціал енергії вітру для забезпечення електропостачання малих та середніх промислових об'єктів. Однак рекомендується використовувати

аккумуляторні батареї або кілька невеликих систем електропостачання для підвищення надійності та уникнення перерв у постачанні електроенергії у періоди безвітря. Виявлено, що територія України (за винятком південних та південно-східних областей) має обмежений енергопотенціал для встановлення сонячних енергоустановок в промисловому масштабі. У зв'язку з цим рекомендується використовувати комбіновані системи електропостачання, які включають декілька менших сонячних енергосистем, а також вітрову установку в якості резервного джерела живлення для стабілізації рівня генерації потужності.

У результаті проведеного дослідження вирішена науково-технічна задача розробки системи електропостачання сільськогосподарського підприємства за допомогою комбінованої системи на основі сонячної енергії. З'ясовано, що для умов міста Кропивницький найбільш доцільно використовувати сонячні енергосистеми в складі комбінованої системи електропостачання.

Розрахунки для визначення оптимального кута нахилу сонячної панелі в географічних умовах міста Кропивницький підтвердили, що найбільш ефективним для максимальної генерації електроенергії є кут нахилу панелі відносно горизонту рівний 70° .

На основі результатів попередніх досліджень, що стосувалися структури комбінованої системи електропостачання, параметрів електроспоживання та розрахунку оптимального кута нахилу, було вирішено встановити 40 фотоелектричних модулів типу TRINA SOLAR 260P.

У результаті техніко-економічного порівняння базової та розробленої сонячної енергетичної системи виявлено, що через зниження вартості обладнання для нетрадиційної енергетики та постійне зростання тарифів на енергоносії, використання альтернативних джерел енергії, в тому числі сонячної, є економічно вигідним для більшості споживачів, навіть без застосування пільгових "зелених" тарифів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.
2. Закон України «Про альтернативні джерела енергії», редакція від 16.07.2015 [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/555-15>. – С 1.
3. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 82 с
4. Державна служба статистики України : офіц. сайт. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення – 28.09.2019).
5. Про схвалення Стратегії розвитку експорту продукції сільського господарства, харчової та переробної промисловості України на період до 2026 року : Розпорядження КМУ від 01.07.2019 № 588-р. / Кабінет Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/588-2019-%D1%80/> (дата звернення – 28.09.2019).
6. Кудря С.О., Головка В.М. «Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії» – Київ 2009. – 201с
7. Дероган Д.В., Марчук С.В., Панченко Г.Г. «Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України» - Київ 2001 р.
8. Козирський В. В., Трегуб М. І., Петренко А. В. Обґрунтування принципів адаптивного регулювання навантаження сільськогосподарських автономних вітроелектричних установок. Науковий вісник Національного

університету біоресурсів та природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». Київ, 2013. Вип. 166, Ч.3. С. 22-31.

9. Лежнюк П. Д. Особливості роботи відновлюваних джерел енергії в локальній електричній системі / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, В. В. Кулик // Відновлювана енергетика XXI століття : матеріали XII міжнарод. наук.-практ. конференції. – Крим, 2011.– С. 42–46.

10. Еко-електрика {Електронний ресурс}: який кут нахилу сонячних батарей оптимальний:- режим доступу:- <http://eco-electrics.com.ua/novosti/iakii-kut-nahilu-soniachnih-batarei-optimalnii>

11. Щур І. З., Климко В. І. Методика розрахунку показників електропостачання окремого об'єкта від гібридної вітросонячної системи. Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. 2014. Вип. 1(2). С. 83–85.

12. <https://vinur.com.ua/ua/aboutus/usefull-info/articles/zahody-bezpeky-pid-chas-roboty-iz-sonyachnymy-panelyamy-ta-batareyamy>

13. Носенко Ю. Сучасні сонячні технології / Юрія Носенко // Життєве середовище. - №18(241) – 2012. – С 1.

14. Третьяков О. Охорона праці: навч. посібник / О. В. Третьяков, В. В. Зацарний, В. Л. Безсонний ; ред. К. Н. Ткачук. - К. : Знання, 2010. - 168 с. – Тема 7.

15. Рикованова І. С., Таранський І. П., Донець Д. М. Вітрова електрогенерація: світовий досвід та перспективи розвитку в Україні. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Логістика. 2017. № 863. С. 159–167.

16. Савченко Є. Застосування сонячної енергії у сільському господарстві України : можливості і проблеми. Аграрна економіка. 2012. Т. 5, № 1-2. С. 128-135.

17. Міністерство енергетики та вугільної енергетики. Статистична інформація : офіц. сайт. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/#> (дата звернення – 29.09.2019).

18. The International Energy Agency. Key World Energy Statistics. URL: <https://www.iea.org/statistics/kwes/> (дата звернення – 29.09.2019).

19. Lazard. Levelized Cost of Energy and Levelized Cost of Storage 2018. URL: <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-and-levelized-cost-of-storage-2018/> (дата звернення – 29.09.2019).

20. Український гідрометеорологічний центр : офіц. сайт. URL: https://meteo.gov.ua/ua/33345/climate/climate_stations/ (дата звернення – 29.09.2019).