МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ Ю.М.ПОТЕБНІ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

на тему: «Підвищення рівня енергоефективності автономної електроустановки»

Виконав: Студент IV курсу, групи 6.1410
Рибак Олександр Володимирович _____
спеціальності
141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
освітньо-професійна програма
141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
Керівник: к.т.н., доцент
Башлій Сергій Вікторович _____
Рецензент: професор, заступник завідувача
кафедри
Артемчук Віктор Васильович _____

Запоріжжя 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ Ю.М.ПОТЕБНІ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕІКФС

ІННІ ЗНУ

Коваленко В.Л.

26 грудня 2023 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти «бакалавр»

Рибаку Олександру Володимировичу

1. Тема проекту «Підвищення рівня енергоефективності автономної електроустановки»
Науковий керівник роботи Башлій Сергій Вікторович, доцент, к.т.н.
Затверджені наказом по університету №2215-с від «28» листопада 2023 р.
2. Строк подання студентом роботи:19.06.2024 р.
3. Вихідні дані проекту: Перспективи застосування АЕУ в сучасних реаліях, потужності енергогенераційних приладів, значення ємностей акумуляторних систем, потужності навантажень та категорії споживачів
4. Зміст пояснювальної записки:
а) загальна частина – відомості про застосування та конструкцію АЕУ
б) аналітична частина – опис технічних характеристик елементів АЕУ
в) електрична частина – виведення техніко-математичних параметрів обладнання АЕУ
5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:
1) Ілюстрації технічного обладнання електрогенеруючих систем
2) Графіки значень та відношень електрогенеруючого обладнання, графіки потужностей, графіки навантаження споживачів
3) Принципова схема автономної електроустановки

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
1. Автономні електричні системи	Башлій С.В., к.т.н., доцент кафедри ЕІКФС	
2. Технічні та технологічні передумови застосування автономних електроустановок	Башлій С.В., к.т.н., доцент кафедри ЕІКФС	
3. Можливості підвищення енергоефективності за рахунок вдосконалення складу АЕУ	Башлій С.В., к.т.н., доцент кафедри ЕІКФС	

7. Дата видачі завдання: 26 грудня 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Примітка
1	Аналіз сучасного стану задіяння автономних електроустановок	до 18.05.2024	
2	Основні елементи та структурна схема автономних електроустановок	до 20.05.2024	
3	Визначення та написання теоретичної бази	до 22.05.2024	
4	Дослідження методів підвищення енергоефективності	до 23.06.2024	
5	Оформлення роботи та презентації, підготовка до захисту	до 26.05.2024	

Студент: Рибак О.В. _____

Науковий керівник роботи: Башлій С.В _____

Нормконтроль здійснив: Башлій С.В _____

РЕФЕРАТ

Рибак О.В. Підвищення рівня енергоефективності автономної електроустановки. Кваліфікаційна робота бакалавра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», науковий керівник С.В. Башлій. Запорізький національний університет, Навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, група 6.1410. Запоріжжя, 2024.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з: 90 аркушів, 80 сторінок, 27 рисунків, 4 таблиці, 19 переліків посилань.

Мета роботи – вивчення можливостей підвищення ефективності автономних електроустановок. Для досягнення мети використано розрахункові та аналітичні методи, кліматична характеристика заданих регіонів.

Представлена загальна та схематична структури автономних електроустановок їх техніко-економічний аналіз. Приведений широкий опис обладнання, яке використовується для енергетичних перехідних процесів.

Сучасні автономні електроустановки, які використовують технології відновлювальних джерел енергії, потребують більшої ефективності у видобутку електричної енергії для споживача. Завдяки введенню у таку енергосистему сучасні модифікації, їх ефективність може зрости до 50%.

АВТОНОМНА ЕЛЕКТРОУСТАНОВКА, АВТОНОМНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ВІТРОВІ ГЕНЕРАТОРИ, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, СОНЯЧНА РАДІАЦІЯ, ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ 6

ВСТУП 7

1. АВТОНОМНІ ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ 8

1.2 Аналіз застосування автономних електростанцій 10

1.3 Перехід автономної електроустановки до розподільчої генерації 12

1.4 Сучасний стан закордонного та вітчизняного розвитку введення автономних електростанцій 14

1.5 Висновки до розділу 1 21

2. ТЕХНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЗАСТОСУВАННЯ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК 23

2.1 Структурна схема 23

2.2 Кліматичні та географічні умови генерації 24

2.3 Виробництво електроенергії з ВДЕ 28

2.3.1 Фотовольтаїчні системи 29

2.3.2 Вітрогенератор 32

2.3.4 Резервний генератор на вуглеводневому палеві 36

2.4 Акумуляторна система 38

2.5 Інвертор 40

2.6 Контролер заряду 43

2.7 Споживач 44

2.8 Висновки з розділу 2 52

3. МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЗА РАХУНОК ВДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУРНОГО СКЛАДУ АЕУ 55

3.1 Порівняльний аналіз визначення «енергоефективність» 55

3.2.1 Поглинання сонячної енергії 57
3.2.2 Модифіковані енергоопоглинаючі комірки 60
3.2.3 Розрахунок видобутку електроенергії модифікованими фотовольтаїчними системами 62
3.3 Підвищення енергоефективності АЕУ за рахунок ВГ 64
3.4 Розрахунок ємності акумуляційних систем 69
3.5 Висновки з розділу 3 74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 76
СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ 77
Додаток А 81

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АЕС – автономна електрична система;

АЕУ – автономна електроустановка;

АСЕП – автоматизовані системи енергопостачання;

ВГ – вітрогенератор;

ВДЕ – відновлювальні джерела енергії;

ВЕС – вітряна електростанція;

ВТ – вітротурбіна;

ДСТУ – державний стандарт України;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

СЕС – сонячна електростанція;

ФВС (PV) – фотовольтаїчні системи;

CSP – концентрована сонячно-теплова енергія.

ВСТУП

Сучасні технології, які вимагають більше енергії, порівняно з людською силою, повністю залежать від джерел електричної енергії. Вже давно прийнято вважати за факт, що електротехніка відіграє ключову роль у задоволенні людських потреб, як фізіологічних, так і інтелектуальних.

Так звана «автономність» енергетичних систем, які не потребують постійного свідомого технологічного контролю, дозволяє людині зосередитися на отриманні фізичних та інтелектуальних результатів, які пізніше використовуються для поставлених людиною завдань.

Протягом останніх десятиліть стало більш поширеною практика використання автономних електричних установок, які можуть бути підключені або не підключені до загальної (державної) енергосистеми і використовують «альтернативні» джерела енергії. На даний момент, потужність таких автономних установок може сягати від мікровеличин до сотень мегаватт.

Потреби в електроенергії зростають зі збільшенням використання енергії технологіями, що призводить до збільшення кількості завдань, поставлених людиною, і, відповідно, такий причинно-наслідковий ланцюг продовжується. Зі свого боку, попит на використання автономних електричних установок розвиває цю ж енергетичну галузь, завдяки чому створюються нові, більш продуктивні моделі виробництва електроенергії.

У даній роботі буде розглянуто сутність автономної електроустановки середньої потужності, її елементів та можливості до їх підвищення енергоефективності. Приведено аналіз складових частин електроустановок з метою підвищення енергоефективності, завдяки чому електроустановка може виробляти електроенергію на 50% на різницю від немодернізованої.

1. АВТОНОМНІ ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ

1.1 Термінологія та характеристики автономних електричних систем

Автономна електрична система – це система, призначена для виробництва, зберігання та споживання електроенергії без необхідності підключення до централізованих електричних мереж. Такі системи здатні працювати незалежно, забезпечуючи енергію для різних потреб. Вони відіграють важливу роль у сучасній енергетиці, забезпечуючи незалежне енергопостачання в умовах відсутності доступу до централізованих електричних мереж або в разі необхідності підвищення надійності та стійкості електропостачання.

В умовах стрімкого розвитку технологій та збільшення потреб в енергопостачанні віддалених регіонів та об'єктів, автономні системи стають дедалі актуальнішими. Такі системи стають дедалі актуальнішими в умовах зростаючих потреб у надійному та екологічно чистому енергопостачанні, особливо у віддалених і важкодоступних регіонах.

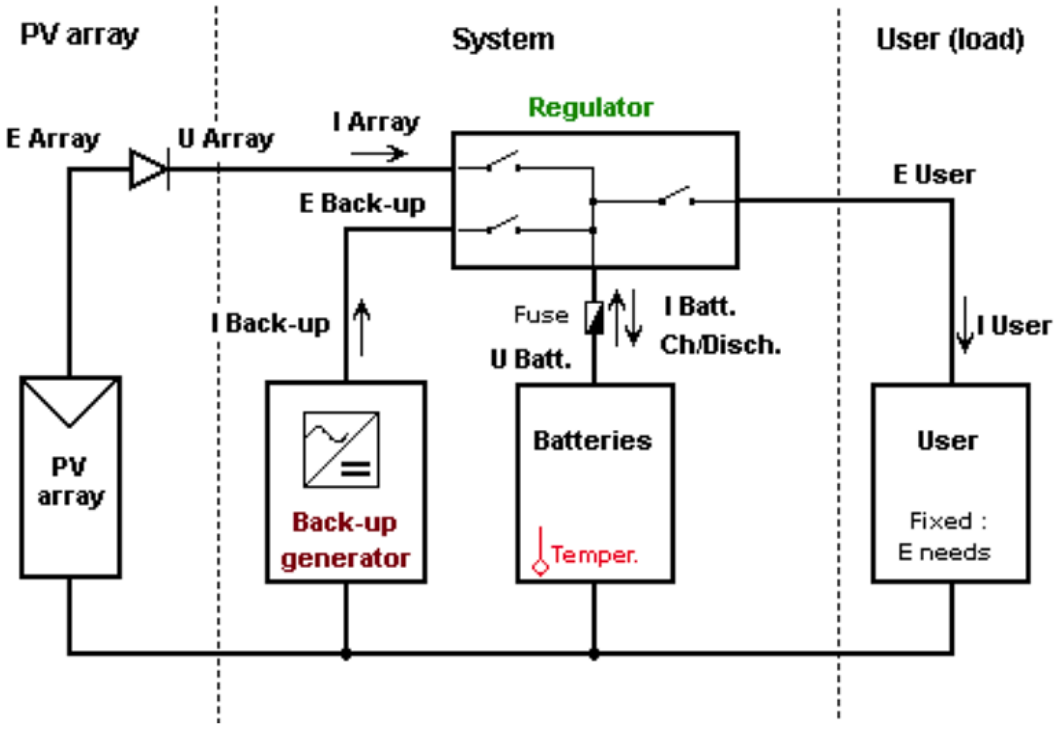


Рисунок 1.1 – Принципова схема автономних електричних систем

Розміри і масштаб автономної електричної системи можуть варіюватися залежно від її призначення і потреб.

Мікрогенеративні потужності:

– Переносні та мобільні пристрої: потужність від декількох ват до декількох кіловат. Приклади: портативні зарядні пристрої, невеликі сонячні генератори для кемпінгу.

Малої потужності:

– від 1 до 10 кВт. Приклади: домашні сонячні установки, системи на основі вітру для приватних будинків.

Середньої потужності:

– Комерційні та промислові об'єкти: потужність від 10 до 1000 кВт. Приклади: системи електропостачання для офісів, невеликих виробництв, фермерських господарств.

Великої потужності:

– Енергопостачання селищ і великих об'єктів: потужність від 1 МВт і вище. Приклади: енергосистеми для віддалених селищ, великих промислових підприємств.

Якщо розглядати автономні генеруючі системи за екологічною характеристикою, використання ВДЕ в таких електроустановках дає змогу значно скоротити викиди парникових газів і мінімізувати вплив на навколишнє середовище. Такі системи використовують ВДЕ, знижуючи споживання викопних палив і зменшуючи вуглецевий слід.

Автономна електроустановка – комплекс взаємопов'язаних машин, апаратів, ліній і допоміжного устаткування (разом із будівлями і приміщеннями, у яких вони встановлені), призначених для виробництва, трансформації, передавання, розподілу електричної енергії та перетворення її в інший вид енергії. Електроустановки за умовами електробезпеки поділяють на електроустановки до 1 кВ і електроустановки понад 1 кВ (за діючим значенням напруги).

У даній роботі буде розглядатися електроустановка середньої потужності, що призначена для автономного енергопостачання об'єктів або груп об'єктів, які споживають в середньому від 10 кВт до 1 МВт електроенергії. Такі установки включають в себе генератори, системи зберігання енергії та обладнання для управління енергетичними потоками, що працюють на основі відновлюваних джерел енергії. Автономні електроустановки на основі ВДЕ забезпечують надійне та екологічно чисте енергопостачання для будинків, ферм або невеликих підприємств. У таких установках зазвичай використовуються сонячні панелі та акумуляторні батареї, що дає змогу знизити залежність від нестабільних централізованих мереж і зменшити витрати на електроенергію.

АЕУ не потребують підключення до зовнішніх мереж, або можуть бути модифікованими до гібридних, які використовують зовнішні джерела енергії в поєднанні з локальними генераторами для підвищення надійності енергопостачання.

1.2 Аналіз застосування автономних електростанцій

У важкодоступних місцях і у віддалених поселеннях, де немає доступу до централізованих електромереж, автономні установки на основі ВДЕ є єдиним стійким джерелом електроенергії, якими також забезпечують енергопостачання житла, освітлення, водопостачання та інших систем. АЕУ використовують для забезпечення енергією будівельних майданчиків, тимчасових таборів та інших об'єктів, які потребують мобільних джерел енергії, які швидко розгортаються.

Автономні установки на основі ВДЕ забезпечують зниження витрат на електроенергію завдяки використанню безоплатних джерел енергії (сонця, вітру, геотермальних джерел) і зменшенню потреби в дорогому привізному паливі. Крім того, такі системи вимагають мінімальних експлуатаційних витрат, що робить їх економічно вигідними в довгостроковій перспективі.

За місцем встановлення, АЕУ розташовують:

- На площині(ґрунт, платформи на воді): Встановлення автономних електростанцій на рівній місцевості характеризується простішими умовами для будівництва та експлуатації. У таких умовах простіше встановлювати сонячні панелі, вітрові турбіни та біогазові установки. Плоскі поверхні забезпечують стабільне розташування та оптимальний напрямок для сонячних панелей, а також мінімальні витрати на монтаж інфраструктури.
- На рельєфній місцевості(схили, пагорби, ін): Встановлення на рельєфній місцевості, вимагає більш складних інженерних рішень. Однак такі місцевості часто мають високий потенціал для використання вітрової та гідроенергетики. Вітряні установки можуть бути розміщені на вершинах пагорбів, де швидкість вітру вища, а малі гідроелектростанції можуть ефективно використовувати перепади висот і потоків річок для генерації енергії. Важливо враховувати труднощі з транспортуванням обладнання та необхідністю створення стійких і безпечних монтажних платформ.

На практиці інтеграцію розподілених фотоелектричних генераторів уже реалізовано в низці країн і регіонів. Як приклад, у Німеччині та Австралії широко застосовуються системи мікрогенерації(до 1кВ) на основі сонячних панелей, які доєднаються до розподільчих мереж і приватних домогосподарств. Це дало змогу істотно знизити вартість електроенергії для споживачів і підвищити стійкість енергетичних систем. Проте висока вартість встановлення та інтеграції таких систем вимагає значних капітальних вкладень і підтримуючих заходів з боку держави.

Автономна когенеративна установка (або когенераційна система) являє собою особливий тип автономних електроустановок, здатних одночасно генерувати електричну і теплову енергію. Цей подвійний процес виробництва енергії відомий як когенерація, або комбіноване виробництво тепла та електроенергії, що підвищує загальну ефективність використання палива. Когенеративні установки є оптимальним вибором для об'єктів, де потрібна як електрична, так і теплова енергія, що робить їх особливо актуальними для різних промислових підприємств, житлових комплексів і віддалених поселень.

Основний принцип роботи автономної когенеративної установки полягає в такому: паливо спалюється в генераторі, при цьому вивільняється енергія, яка використовується для генерації електрики. Тепло, що утворюється під час цього процесу, не утилізується, як у традиційних електростанціях, а використовується для виробництва теплової енергії, що дає змогу знизити втрати енергії та підвищити загальну ефективність системи.

1.3 Перехід автономної електроустановки до розподільчої генерації

Розподільча енергетика – це концепція організації енергетичних систем, за якої електроенергія виробляється і споживається поблизу місця її використання. Це суттєво відрізняється від традиційної централізованої енергетики, де електроенергія генерується на великих електростанціях і передається на великі відстані.

Активна економічна підтримка, що надається країнами, які лідирують у розвитку відновлюваних джерел енергії, стимулює зростання виробництва електроенергії на основі альтернативних джерел, таких як сонячна енергія, вітроенергетика і геотермальна енергія. Державні субсидії, податкові пільги та інвестиції в дослідження і розвиток технологій ВДЕ сприяють прискоренню впровадження цих систем в енергетику. Проте значна вартість встановлення та експлуатації систем на основі ВДЕ залишається ключовим бар'єром для їхнього ширшого розповсюдження, що може негативно позначатися на темпах їхнього зростання та економічній ефективності.

За останнє десятиліття концепція інтеграції розподілених фотоелектричних генераторів у наявні автоматизовані системи енергопостачання перейшла на новий рівень. Ці генератори стали невід'ємною частиною сучасної енергетичної інфраструктури, пропонуючи безліч переваг, включно зі зниженням витрат на розподіл електроенергії, підвищенням гнучкості та надійності енергосистем. Локальна генерація дає змогу зменшити

втрати енергії в мережах і відтермінувати необхідність в інвестиціях у розвиток електричної інфраструктури, включно з лініями передавання та розподілу електроенергії.

За питанням реалізації, інтеграція автономних або розподілених генераторів у наявні електричні мережі низької напруги (0,4 кВ) пов'язана з низкою технічних та економічних проблем. Основні виклики включають:

- *Регулювання напруги*: введення розподілених джерел енергії може призвести до коливань напруги в мережі, що вимагає більш складних систем управління для підтримки стабільної напруги.
- *Флікери напруги*: коливання напруги, спричинені змінною генерацією сонячної та вітрової енергії, можуть погіршувати якість електроенергії.
- *Нерівномірність добового графіка споживання*: Мінливість генерації ВДЕ, що не збігається з піковими навантаженнями споживачів, ускладнює балансування енергосистеми.
- *Вартість інтеграції*: Витрати на інтеграцію розподілених генераторів включають модернізацію мережевої інфраструктури, встановлення додаткових засобів управління та зберігання енергії, а також розробку нових нормативних актів.

Традиційно електричні мережі спроектовані з урахуванням одностороннього потоку потужності, де електроенергію передавали від великих централізованих генераторів через магістральні та розподільчі мережі до кінцевих споживачів. Однак із розвитком розподілених генераторів, це правило перестає бути актуальним. Електроенергія тепер може вироблятися і споживатися «локально», що вимагає переосмислення підходів до управління енергосистемами.

Розподілені генератори на основі АЕУ забезпечують електроенергією безпосередньо прилеглі навантаження або точки підключення до мережі, що значно зменшує втрати на передачу та розподіл. Однак їхня потужність та обсяги генерації, очевидно, відносно невеликі порівняно з традиційними великими електростанціями. Потік активної потужності від таких джерел

обмежений, що ускладнює їхню інтеграцію в магістральні мережі, особливо за наявності великої кількості підключених розподілених генераторів. У таких умовах необхідно враховувати не тільки технічні аспекти, а й економічну доцільність.

У штатах Каліфорнії та Нью-Йорку(рис. 1.3) впровадження розподілених джерел енергії також супроводжується розвитком інтелектуальних мереж і систем управління, що дає змогу краще інтегрувати і використовувати потенціал ВДЕ. Ці проекти вказують на те, що, незважаючи на складність і високі витрати, така інтеграція розподілених генераторів в енергосистеми може бути економічно вигідною в довгостроковій перспективі, сприяючи зниженню залежності від викопних палив і поліпшенню екологічної ситуації. У країнах, таких як Індонезія та Філіппіни, перехід на децентралізовану енергетику дав змогу поліпшити доступ до електричних ресурсів на віддалених островах. Так, на острові Сібуян на Філіппінах автономна сонячна електростанція потужністю 200 кВт забезпечує енергією місцеве населення та об'єкти інфраструктури, що дає змогу їм відмовитися від використання дорогого дизельного палива. «Solar Philippines», зареєстрований на біржі підрозділ манільського виробника фотоелектричних модулів і розробника проектів «SP New Energy Corporation», підтвердив сьогодні, що розпочав розчищення землі під будівництво флагманської сонячної електростанції Terra Solar потужністю 4 ГВт в Нуева Ехія і Булакан, розташованих на півночі Філіппін [1].

1.4 Сучасний стан закордонного та вітчизняного розвитку введення автономних електростанцій

З розвитком технологій і зниженням вартості компонентів автономних електричних систем, на кшталт сонячні панелі та акумуляторні батареї, очікується подальше збільшення їхньої поширеності та доступності. Важливу роль у цьому процесі відіграють урядові програми та ініціативи, спрямовані на підтримку і розвиток автономних енергетичних систем. У майбутньому

очікується зростання кількості таких систем і збільшення їхньої ролі в забезпеченні сталого та надійного електропостачання. В умовах глобальної енергетичної кризи та необхідності переходу до більш стійких джерел енергії, автономні електростанції являють собою одну з ключових стратегій для забезпечення енергетичної безпеки та незалежності.

Останніми роками в низці регіонів світу вартість електроенергії, виробленої сонячними панелями, значно знизилася і стала конкурентоспроможною порівняно з традиційними джерелами, такими як вугільні та газові електростанції. У таких країнах, як Німеччина, Китай, Індія і Мексика, а також у деяких частинах США, вартість виробництва електроенергії з сонячних панелей уже перебуває на рівні або нижче вартості виробництва електроенергії з викопних джерел. Наприклад, в Індії 2019 року було зафіксовано рекордно низькі ціни на сонячну електроенергію на рівні 2,44 рупії за кВт-год, що становить близько 0,03 долара США за кВт-год, що значно дешевше за енергію, вироблену вугільними станціями.

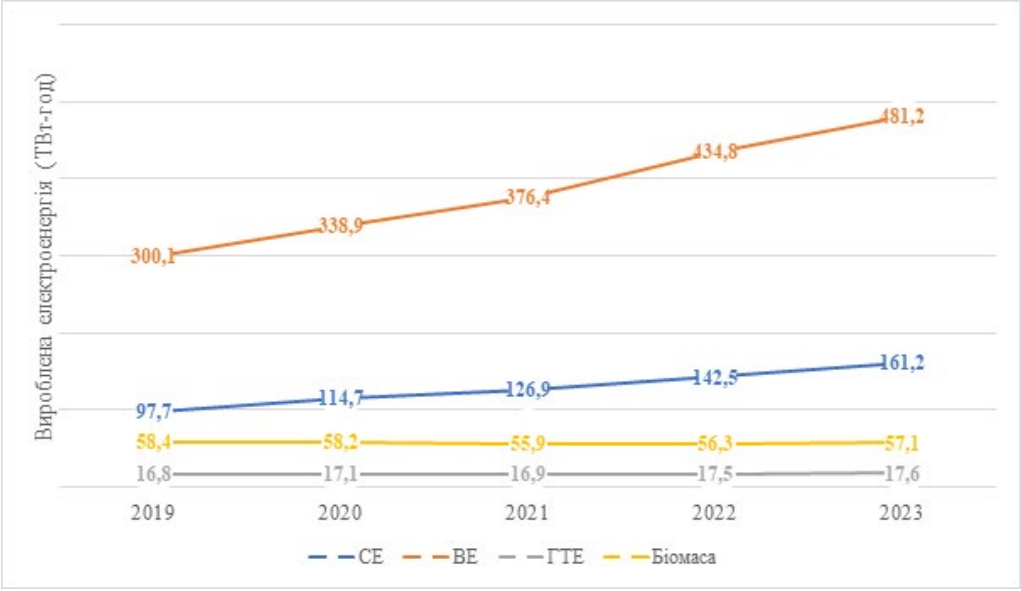


Рисунок 1.2 – Видобуток електроенергії системами ВДЕ (сонячна енергія, вітроенергетика, геотермальна енергія та біомаса) в США за останні 5 років. СЕ – сонячна енергія; ВЕ – вітрова енергія; ГТЕ – геотермальна енергія

Зібрані дані [2] показують тенденції розвитку альтернативної енергетики в Сполучених Штатах за останні 5 років. Продовження інвестицій у відновлювані джерела енергії та підтримка на державному рівні сприяють подальшому збільшенню їхньої частки в загальному енергетичному балансі.

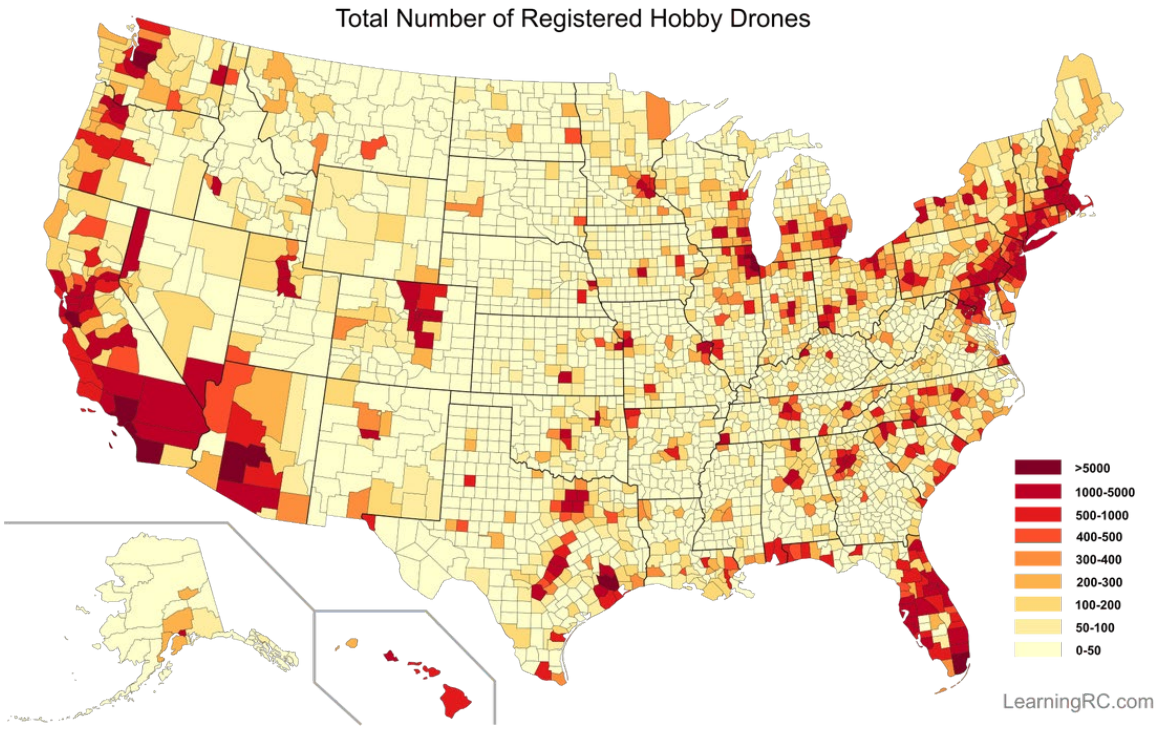


Рисунок 1.3 – Мапа поширеності ВДЕ у США

У країнах, що розвиваються, і регіонах з обмеженим доступом до електроенергії автономні системи стають ключовим елементом забезпечення енергопостачання. В Африці, Азії та Латинській Америці безліч проектів спрямовано на створення автономних систем для забезпечення електроенергією віддалених сільських районів і невеликих селищ. Такі системи допомагають розв'язувати проблеми енергетичного дефіциту і сприяють поліпшенню якості життя населення. У віддалених регіонах Європи та Північної Америки фермери активно використовують автономні сонячні та вітрові установки для забезпечення енергією своїх господарств, що дає змогу не тільки скоротити витрати на електроенергію, а й просувати стійкі методи ведення сільського господарства. У Кенії та Танзанії лікарні та школи у віддалених районах використовують автономні системи на основі сонячних панелей і акумуляторів, забезпечуючи стабільне електропостачання для освітніх і медичних потреб.У

країнах ЄС розподілена генерація виробляє в середньому близько 10% від загального обсягу виробництва електроенергії, найвищий показник – у Данії 50%. У США експлуатується понад 12 млн установок малої розподіленої генерації загальною встановленою потужністю понад 220 ГВт, а темпи приросту становлять у середньому 5 ГВт на рік. У цілій низці промислово розвинених країн, як-от США або Австралія, встановлюються акумуляторні станції. Ще 2021 року було запущено батарею Tesla Megapack поруч із містом Джелонг у межах австралійського штату Вікторія. На об'єкті буде достатньо енергії для забезпечення функціонування 500 тис. будинків протягом години.

В Україні, з її різноманітним географічним потенціалом і потребами в поліпшенні екологічної ситуації, запровадження автономних електростанцій може стати рішенням для багатьох актуальних проблем. Україна має значний географічний потенціал для розвитку автономних електростанцій, заснованих на різних ВДЕ:

- У середньому, регіони України мають потенціал у 1700-2500 сонячних годин на рік, що робить можливим ефективне використання сонячних панелей для генерації електроенергії, по суті, у будь-якому місці країни. Одеська, Херсонська, Запорізька області мають найбільший потенціал для розвитку сонячних електростанцій. Висока інтенсивність сонячного випромінювання дає змогу отримувати значні обсяги електроенергії протягом більшої частини року.
- Приазов'я та Крим характеризуються високим вітровим потенціалом, що робить їх ідеальними для встановлення вітрових електростанцій. Вітрові ресурси тут дають змогу створювати великі автономні установки, здатні забезпечувати енергією як невеликі населені пункти, так і промислові об'єкти.
- Сільськогосподарські регіони України мають значний потенціал для виробництва біомаси та біогазу. У Центральних та західних регіонах зосереджена велика кількість сільськогосподарських підприємств, які можуть використовувати відходи своєї діяльності для виробництва енергії.

Розвиток біогазових установок може значно скоротити залежність від викопних джерел палива.

– Річки та водойми України також надають можливості для розвитку малої гідроенергетики. Карпати і Полісся мають численні річки і водотоки, які можна використовувати для будівництва автономних гідроелектростанцій.

Дивлячись на екологічну проблему, багато міст України мають високий рівень забруднення повітря і води, що негативно позначається на здоров'ї населення та довкіллі. Основними джерелами забруднення є промислові підприємства, транспорт і застарілі системи опалення. Київ, столиця України, регулярно стикається з проблемою забруднення повітря через велику кількість автотранспорту та промислових викидів. Високий рівень забруднення повітря і води в місті Дніпро пов'язаний з роботою металургійних підприємств. Промисловий центр міста Запоріжжя, відомий своїми заводами, також стикається з серйозними екологічними проблемами – міське населення часто скаржиться на металевий сморід у житлових районах.

Розвиток автономних електростанцій в Україні відкриває широкі можливості для інвестицій як на національному, так і на міжнародному рівнях. Такі проекти можуть сприяти створенню нових робочих місць, розвитку інфраструктури та покращенню економічної ситуації в регіонах країни [3]. Нині існує безліч іноземних програм, спрямованих на підтримку проектів у галузі відновлюваної енергетики.

З моменту повномасштабної військової інтервенції (2022), стан енергосистеми України вкрай нестабільний. Крім того, що безліч електростанцій, як традиційних, так і тих, що працюють на ВДЕ, опинилися за непідконтрольною лінією фронту і неможливо відстежити працездатність, сюди ж належить і регулярний обстріл енергетичних об'єктів по всій території держави [4]. Із жовтня 2022 року російські військові почали системно обстрілювати об'єкти енергетичної інфраструктури України: генерувальні потужності (гідро-, теплові електростанції, теплоелектроцентралі), підстанції (призначені для передавання, перетворення та розподілу електроенергії) і

газовидобувні об'єкти. Дослідники підрахували, що збитки і втрати енергетичного сектору України станом на травень становлять 56,2 мільярда доларів, а енергосистема загалом втратила свій енергетичний потенціал на 50%. При цьому пряма шкода інфраструктурі оцінюється в 16,1 мільярда доларів[5]. Великих збитків зазнали ТЕС. «Укренерго» повідомляє, що у виробництві електроенергії від них в Україні впала з приблизно 30 до 5%. За даними Міненерго України, у країні знищено понад 8 ГВт генерувальних потужностей, що становить близько 40% від наявних у системі.



Рисунок 1.3 – Колаж фотографій зруйнованої енергетичної інфраструктури

Такі атаки не тільки небезпечні для інфраструктури, але також і можуть спричинити надзвичайні події, унаслідок яких населення буде змушене не тільки змінити свій режим діяльності, але також і вимушено евакуюватися з небезпечних зон. Як приклад, це захоплена військами РФ Запорізька атомна електростанція, розташована в Енергодарі (Запорізька область). Неодноразово надходили від моніторингової організації «міжнародне агентство з атомної

енергії» про порушення експлуатації, що може підвищити ризик переведення станції в аварійний режим. До цього ж пункту можна і приписати руйнування греблі Каховської ГЕС, унаслідок чого було затоплено 14 населених пунктів із населенням близько 16 тисяч осіб на правому березі Дніпра, і 14 із населенням близько 22 тисяч осіб – на лівому, окупованому Росією, а збитки від загибелі біоресурсів уряд України оцінив приблизно у 285 млн доларів[6]. Також, до цієї теми можна додати атаки по Трипільській ТЕС (3600 МВт) у Київській області, що повністю вивело електростанцію з ладу[7].

Порушення роботи всієї енергосистеми країни аж ніяк не дає гарантій стабільної та безперебійної передачі електроенергії всім споживачам. Ба більше, оскільки наразі немає жодних перспектив щодо припинення вогню, загроза повного вимкнення чільних енергетичних структур цілком імовірна.

Як наслідок, тарифи на використання централізованої електроенергії стають дорожчими, що також вносити серйозний фактор у зміну режиму споживання як побутовими споживачами, так і промисловими. Перший етап підвищення тарифу запровадили з 1 червня 2023 року. Тоді диференційований тариф замінили єдиним. До червня перші 250 кВт-год на місяць коштували 1,44 гривні/кВт-год, за більшого споживання тариф становив 1,68 грн/кВт-год. З 1 червня тариф став єдиним – 2,64 грн/кВт-год. З 1 червня 2024 Кабмін підвищив тариф на електроенергію для населення на 64%, до 4,32 грн/кВт-год [8].

Необхідність підвищення тарифу в уряді пояснюють браком коштів на відновлення енергетики після нової хвилі атак на енергосистему з 22 березня 2024 року. Підвищення тарифу влітку минулого року також пояснювали необхідністю додаткових коштів на відновлення енергосистеми після руйнувань восени та взимку у 2022-2023 роках.

Задля пом'якшення ризику «Blackout», тобто критичного порушення роботи енергосистеми до такого стану, що забезпечення електроенергією від державних мереж буде неможливим, необхідно виконати комплекс завдань, направлених на зменшення споживання. Здається дійсним той факт, що енергетична структура вимагає введення нового розподільчого навантаження за

допомогою автономних або адаптивних джерел електроенергії. Застосування автономних електроустановок, до того ж якраз середніх потужностей, наддасть змогу забезпечити електроенергією не тільки райони міст і невеликих населених пунктів, а й промислові підприємства, транспортні лінії та інше, що дасть змогу зберегти працездатність міст і якість життя окремої людини в ньому.

Використання автономних електроустановок здатне істотно знизити вартість електроенергії для споживачів за рахунок низки ключових факторів, бо вони дають змогу виробляти електроенергію безпосередньо в місці її споживання, що виключає необхідність у дорого вартісному та енергоємному передаванні електричних ресурсів на великі відстані. Це знижує втрати енергії в мережах і, відповідно, може зменшити операційні витрати, які в кінцевому підсумку закладаються в тарифи для споживачів. До того ж, АЕУ з альтернативними джерелами забезпечують доступ до безкоштовних природних ресурсів, що дає змогу уникнути витрат на паливо, характерних для традиційних електростанцій, що працюють на викопному паливі. Низькі експлуатаційні витрати і мінімальна потреба в технічному обслуговуванні таких установок сприяють тривалому терміну служби обладнання та зниженню загальної вартості виробництва електроенергії.

Децентралізація енергосистеми зменшує залежність від коливань цін на енергоносії та міжнародних енергетичних ринків, що веде до більшої стабільності тарифів для кінцевих споживачів.

1.5 Висновки до розділу 1

Автономні електричні системи у найближчому майбутньому можуть стати важливим елементом сучасної енергетики, забезпечуючи незалежне і стійке енергопостачання для різних об'єктів і регіонів. Їх широке застосування і розвиток сприяють вирішенню глобальних завдань щодо забезпечення доступної та чистої енергії, а також допомагають знизити залежність від

централізованих електричних мереж. Впровадження автономних установок на основі ВДЕ дає змогу поліпшити якість життя людей у віддалених та ізольованих регіонах, забезпечуючи надійне і стійке енергопостачання. Це сприяє розвитку інфраструктури, поліпшенню умов життя і створенню нових робочих місць.

Перехід автономних електроустановок у системи децентралізованої енергетики відкриває нові горизонти для забезпечення надійного, стійкого та екологічно чистого енергопостачання. Незважаючи на наявні технічні та економічні складнощі, перспективи розвитку децентралізованої енергетики є багатообіцяючими, а її роль у глобальній енергетичній системі буде тільки збільшуватися.

На сьогодні автономні електричні системи широко поширені по всьому світу, найбільшого поширення вони набули в країнах із розвиненою інфраструктурою відновлюваної енергії, таких як Німеччина, США, Китай і країни Скандинавії. Активна економічна підтримка з боку держав є ключовим фактором, що стимулює зростання і розвиток відновлюваної енергетики.

Автономні та розподільні електроустановки на основі ВДЕ володіють значним потенціалом для підвищення ефективності та стійкості енергосистем, але їхня інтеграція потребує розв'язання низки технічних та економічних проблем. Подальший розвиток і впровадження таких систем сприятиме створенню гнучкіших, стійкіших і екологічно чистих енергетичних інфраструктур, що забезпечують надійне й ефективне постачання електроенергії.

2. ТЕХНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЗАСТОСУВАННЯ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

2.1 Структурна схема

Така схема автономної електроустановки середньої потужності охоплює кілька ключових елементів, кожен з яких виконує свою специфічну функцію в процесі генерації, перетворення, зберігання і розподілу електроенергії. Структура схема в першу чергу обумовлена розділом на математичні параметри, що надає можливість описати схему у вигляді математичних функцій, заснованих на формулах, що описують фізичні явища.

Основними елементами є:

- кліматичні та географічні умови генерації;
- системи генерації електроенергії;
- інвертори або перетворювачі;
- системи зберігання енергії;
- контролери та системи керування;
- розподільні та провідні елементи (заземлення);
- моніторинг і діагностика.

Кожен такий елемент розглядається як енергетично відкритий об’єкт, в якому виконується перехід енергії або схематичне направлення її до іншого об’єкта. Необхідно враховувати, що переходи енергії можуть бути як корисними, тобто, можливими до подальшого використання системою, так і некорисними (втрати).

Споживач у схемі розглядається як другорядний елемент, який не входить безпосередньо в систему автономної електроустановки, а проявляється у вигляді графіків навантаження (споживання). Споживачі можуть бути розділені на кілька категорій, кожна з яких характеризується своїм унікальним профілем споживання електроенергії.

Автономна електроустановка, що використовує відновлювані джерела енергії, являє собою складну систему(рис. 2.1), в якій електричні потоки проходять через безліч етапів, починаючи від генерації енергії і закінчуючи її споживанням.

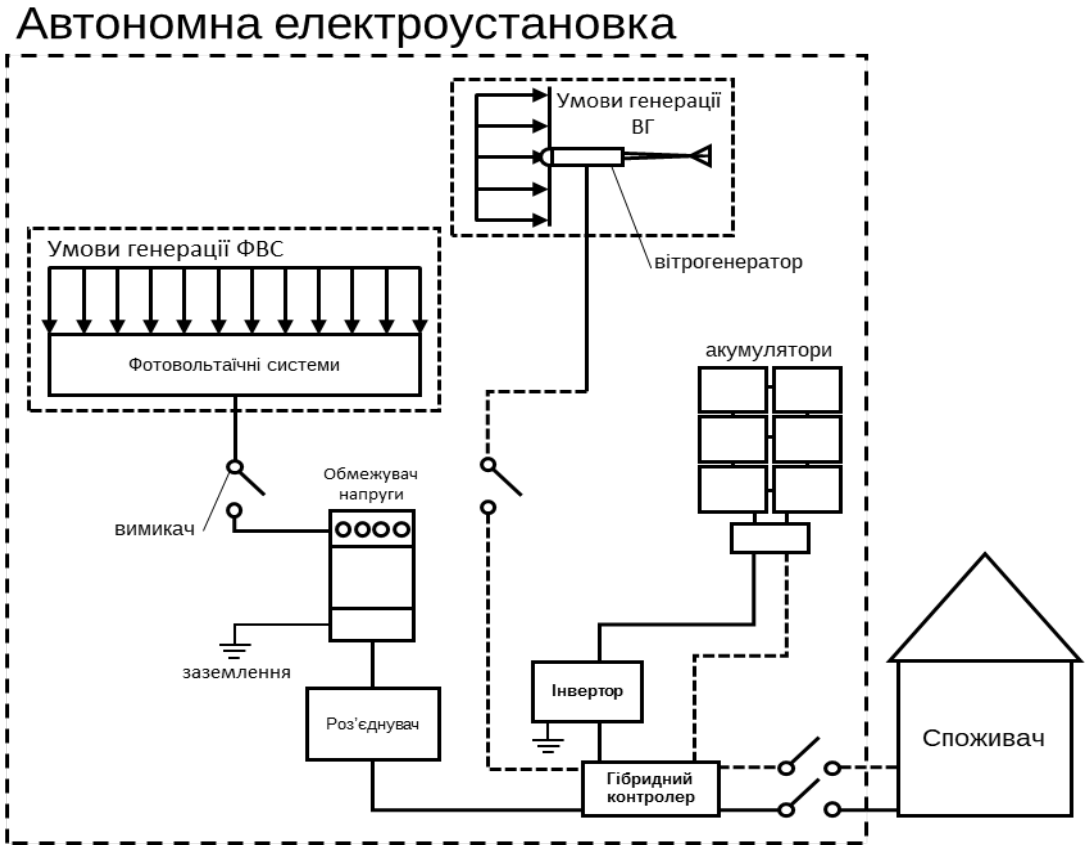


Рисунок 2.1 – Принципова схема АЕУ з гібридною системою, компонентів установки та умов генерації

2.2 Кліматичні та географічні умови генерації

По суті, набір даних або характеристик, які притаманні фізичному та географічному положенню. Саме з них отримують найпривабливіші зони для розташування електричних установок на основі ВДЕ, бо для успішного проектування та експлуатації таких установок необхідно враховувати безліч кліматичних і географічних факторів, які безпосередньо впливають на ефективність генерації електроенергії. Розуміння і правильне врахування цих умов дають змогу оптимізувати роботу установок, що тим самим забезпечує

стабільне і надійне енергопостачання для споживачів. У схему такі умови генерації можна звести до ряду початкових математичних параметрів, завдяки чому можна або розрахувати оптимальні значення.

Такими умовами для сонячних електростанцій будуть:

– *Глобальна сонячна радіація*: Загальна кількість сонячної енергії, одержуваної на одиницю площі за певний час, зазвичай вимірюється в кВт-год/м^2 на день або на рік. Висока інсоляція означає більшу доступність енергії для фотовольтаїчних систем.
– *Пряма сонячна радіація*: Енергія, що надходить безпосередньо від Сонця без розсіювання в атмосфері (до розсіювання становить 1353 Вт/м^2), важлива для ефективності концентрованої сонячно-теплової енергії.
– *Показник атмосферного впливу*: інтенсивність сонячного випромінювання, що доходить до земної поверхні, називається «атмосферною масою» (AM). AM визначається як секанс кута між Сонцем і зенітом[9].

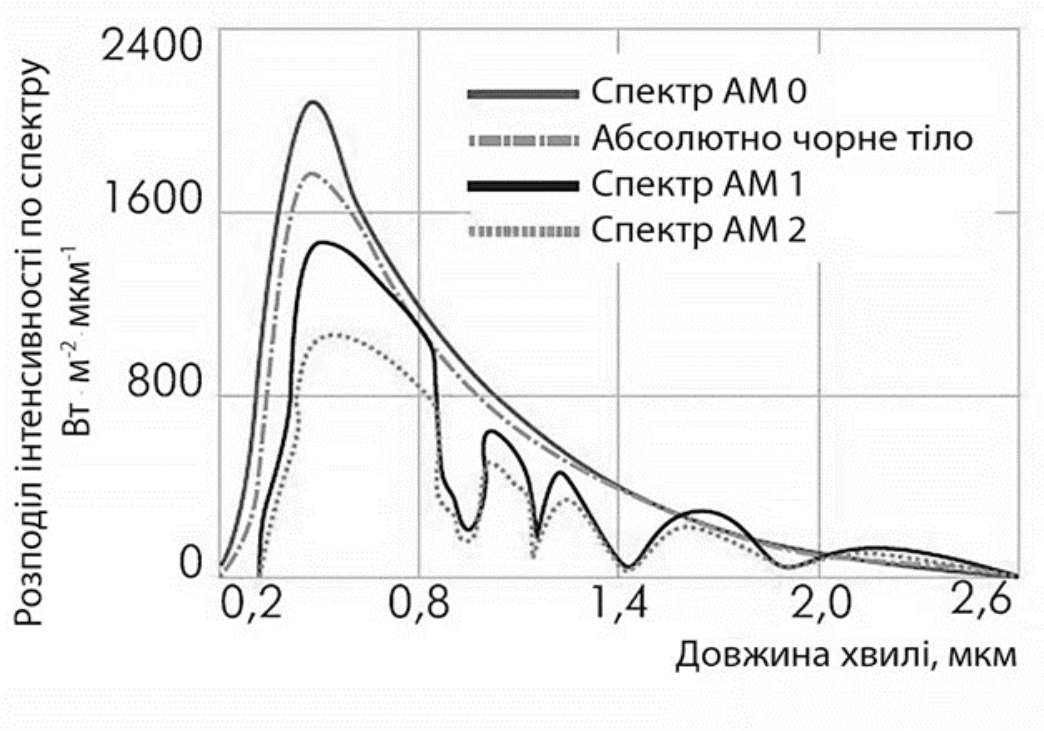


Рисунок 2.2 – Розподіл інтенсивності по спектру сонячного випромінювання

Верхня крива (AM-0) відповідає сонячному спектру за межами земної атмосфери (наприклад, з орбіти), тобто за нульової повітряної маси. Вона

апроксимується розподілом інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла за температури 5800 К. Криві АМ-1 і АМ-2 ілюструють спектральний розподіл сонячного випромінювання на поверхні Землі, коли Сонце в зеніті та за кута між Сонцем і зенітом 60°, відповідно. При цьому повна потужність випромінювання – відповідно близько 925 і 691 Вт/м2. Середня інтенсивність випромінювання на Землі приблизно збігається з інтенсивністю випромінювання при АМ = 1,5 (Сонце – під кутом 45° до горизонту) [9].

- *Час*: Кількість годин, протягом яких сонячне випромінювання перевищує мінімальний рівень для генерації енергії. Залежить від широти, пори року та погодних умов.
- *Хмарність*: Впливає на кількість прямої та розсіяної сонячної радіації, знижуючи продуктивність PV і CSP систем у похмурі дні.
- *Погодні умови*: Дощ і сніг зменшують кількість сонячної радіації, доступної для перетворення в корисну енергію.
- *Температурні ефекти*: Високі температури можуть знизити ефективність сонячних панелей через збільшення внутрішнього опору і зниженого ККД. Оптимальні робочі температури зазвичай знаходяться в діапазоні від 20°C до 25°C.

Умови для вітроустановок:

- *Номінальна швидкість вітру (Cut-in Speed)*: Це мінімальна швидкість вітру, за якої турбіна починає генерувати електричну енергію. Зазвичай вона становить від 3 до 5 м/с.
- *Номінальна робоча швидкість вітру (Rated Wind Speed)*: Це швидкість вітру, за якої турбіна досягає своєї максимальної потужності. Для більшості турбін ця швидкість варіюється від 12 до 15 м/с.
- *Швидкість вимкнення (Cut-out Speed)*: Це швидкість вітру, за якої турбіна автоматично вимикається, щоб уникнути пошкоджень. Зазвичай вона становить близько 25 м/с.

– *Роза вітрів*: розподіл напрямків вітру в конкретній місцевості. Оптимальні умови включають постійний напрямок вітру з мінімальними змінами. Розрахунок рози вітрів виконують завдяки графічним позначенням, як, наприклад, на рисунку 2.3.

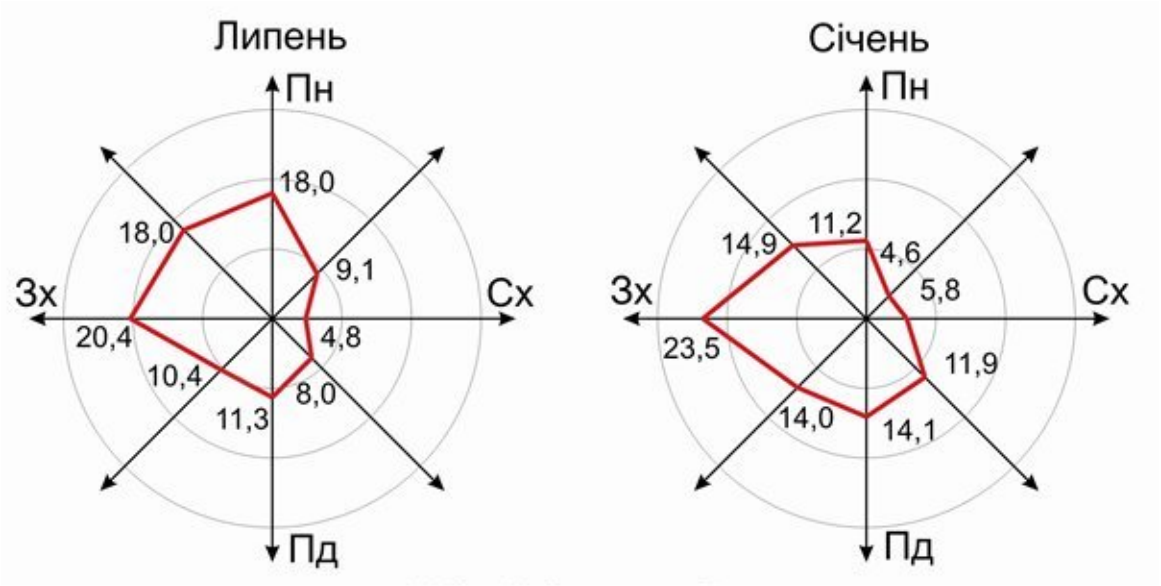


Рисунок 2.3 – Роза вітрів у м. Київ

– *Турбулентність вітру*:це впливає на стабільність роботи турбіни. Висока турбулентність може спричиняти вібрації та підвищений знос обладнання, що знижує його довговічність і ефективність.

– *Висота встановлення*: Що вище розташована вітряна турбіна, то вища швидкість вітру і менша турбулентність. Вітряні турбіни вітряних електростанцій зазвичай встановлюють на висоті від 80 до 150 метрів від землі, що дає змогу використовувати більш стабільні та сильні повітряні потоки.

– *Температура*: Вітряні турбіни можуть працювати в широкому діапазоні температур, але екстремальні холоди або спека можуть вплинути на їхню ефективність. Низькі температури можуть призвести до обмерзання лопатей, що знижує їхню ефективність і збільшує навантаження на механічні компоненти.

2.3 Виробництво електроенергії з ВДЕ

Джерело енергії, яке виробляє електроенергію шляхом її отримання і трансформації із зовнішнього середовища, або із енергетичних переходів всередині себе, є генератором. В АЕУ генератором є окремий прилад або їхня сукупність однакового або різного принципів дії. Кількість генераторів у схемі може бути будь-якої натуральної величини. Функціонал деяких типів генераторів не закінчується тільки на видобутку електричної енергії, а й теплової також, безпосередньо від середовища, або від процесу утворення електричного струму.

Такими генераторами можуть бути:

- *Сонячні генератори*: Фотовольтаїчна технологія (PVT) перетворює сонячне світло на електрику за допомогою панелей, які поглинають енергію сонячних фотонів і генерують електричний струм. Концентрована сонячна енергія (CSP) використовує дзеркала або лінзи для фокусування сонячного випромінювання, нагріваючи теплоносій, який потім перетворюють на механічну та електричну енергію або акумулюють у термальних накопичувачах. CSP зазвичай застосовують на великих електростанціях, забезпечуючи тривале зберігання тепла і стійке енергопостачання.
- *Вітрові турбіни*: Пристрої, що перетворюють кінетичну енергію вітру в електричну.
- *Біогазові установки*: Генератори, що використовують біомасу для виробництва біогазу, який потім спалюється для генерації електроенергії.
- *Малі гідроелектростанції*: Використовують кінетичну енергію води для вироблення електричних ресурсів, особливо ефективні на рельєфній місцевості з перепадами висот. Також, до цього типу можна додати приливну енергетику, незважаючи на інший принцип дії.
- *Геотермальні електростанції*: Використовують природньо нагрітий пар із свердловин що ведуть до підземних зон із підвищеною температурою. Сьогодні найпоширенішим типом геотермальних електростанцій є парові

установки миттєвого випаровування. Отриману геотермальну енергію можна використовувати для безпосереднього обігріву будівель, гарячого водопостачання або виробництва електроенергії.

– *Інші*.

2.3.1 Фотовольтаїчні системи

Основна частина таких систем являють собою плоскі сонячні панелі, в яких перетворення сонячної енергії здійснюється безпосередньо за допомогою фотоелектричних модулів – сонячних панелей (рис. 2.4). Такі системи, як правило, нерухомі і мають фіксовану орієнтацію, проте в них також може бути інтегрована система стеження за сонцем для зміни кута падіння сонячних променів на робочу зону палені,що тим самимпідвищить середню потужність сонячної електростанції в установці.



Рисунок 2.4 – Сонячна панель LR5-72HTH-585M

Для забезпечення надійності та стійкості вироблення електроенергії фотоелектричними модулями необхідна наявність додаткових компонентів: електричні кабелі, підтримувальні конструкції і, залежно від типу системи (за потужністю або автономністю), електронні інвертори та контролери заряду з накопичувачами енергії. У сукупності такі системи називають сонячними фотовольтаїчними системами.

Загалом, ФВС складаються з фотоелектричних модулів, що являють собою масиви з'єднаних між собою сонячних елементів, які генерують електричну енергію. Крім модулів, системи включають так званий баланс системи (balance-of-system, BOS), який охоплює всі компоненти системи, за винятком самих сонячних елементів. До компонентів BOS відносяться кабельні з'єднання, опорні конструкції, акумуляторні батареї, контролери заряду, електронні компоненти для управління системою, перетворювачі постійного струму в змінний та інші допоміжні елементи. Деякі компоненти не є обов'язковими для всіх типів ФЕС і залежать від специфіки застосування та вимог до системи.

Системи з концентрацією сонячного випромінювання (Concentrated Photovoltaics) включають точні системи стеження за сонцем. які забезпечують безперервну зміну орієнтації модулів залежно від положення сонця на небосхилі(рис. 2.5).

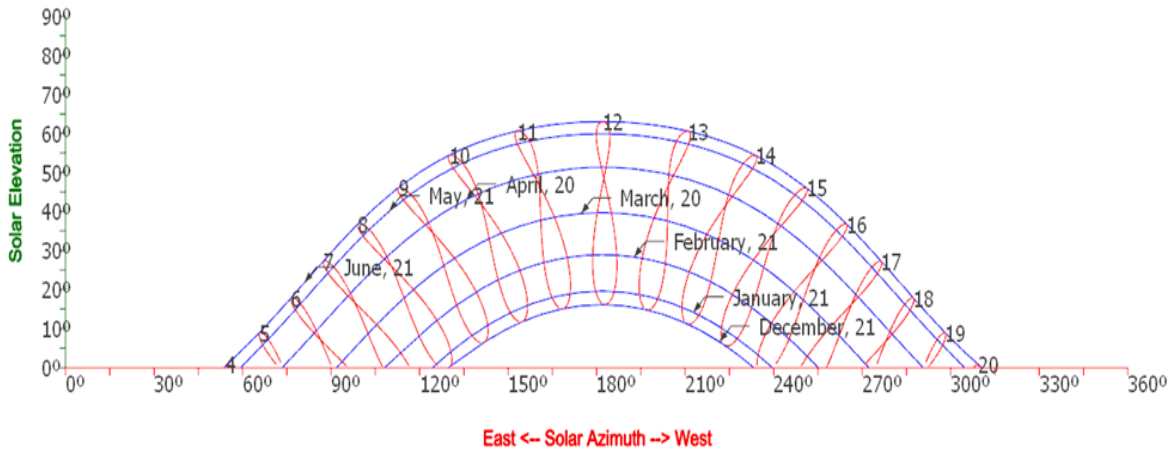


Рисунок 2.5 – Висота підняття сонця протягом року у м. Київ

Зі зростанням ступеня концентрації сонячного випромінювання точність стеження повинна збільшуватися, що вимагає створення спеціальних опорно-поворотних пристроїв, оснащених датчиками положення сонця і електроприводами. У таких системах для відведення надлишкового тепла потрібне примусове охолодження. Для систем із низьким рівнем концентрації випромінювання зазвичай використовують мідні радіатори, тоді як для високих концентрацій уже потрібне водяне охолодження, що забезпечує ефективне тепловиділення і підтримання оптимального температурного режиму роботи фотоелектричних елементів.

Кремнієві фотоелементи перетворюють сонячне випромінювання на електричну енергію, поділяються на кілька типів, кожен з яких має унікальні характеристики, ефективність перетворення енергії та рівень поширеності. У таблиці 2.1 наведено основні види фотоелементів із зазначенням їхнього ККД.

Таблиця 2.1 – Типи фотоелементів за КПД та поширеністю

Тип фотоелемента	КПД (%)	Поширеність
Монокристалічні (Mono-Si)	15-22%	Широке застосування у сонячних установках.
Полікристалічні (Poly-Si)	13-18%	Масове виробництво сонячних панелей.
Тонкоплівкові (InTeCd)	10-16%	Використовуються у малопотужних і гнучких рішеннях.
Кадмій-телуридні (CdTe)	9-12%	Обмежене застосування у малопотужних пристроях.
Мідно-індій-диселенідні (CIS/CIGS)	7-12%	Використовуються у великих сонячних установках.
Аморфні кремнієві (a-Si)	6-9%	Застосовуються у складних і дорогих системах.

Обслуговування сонячних панелей охоплює регулярне очищення для видалення пилу і забруднень, перевірку на пошкодження і надійність кріплень, моніторинг продуктивності для виявлення відхилень, огляд інвертора і очищення його вентиляційних отворів, а також оцінку навколишніх умов щодо

можливого затінення панелей, що дає змогу підтримувати їхню ефективність і продовжити термін служби.

2.3.2 Вітрогенератор

Це пристрій, який перетворює кінетичну енергію повітряних мас в електричну енергію за допомогою вітряних турбін.

Вітер використовується для генерації електроенергії шляхом перетворення кінетичної енергії, утвореної рухомими повітряними потоками. Ця енергія трансформується в електричну за допомогою вітряних турбін або систем конверсії вітрової енергії. Потік повітря впливає на лопаті турбіни, приводячи їх у рух і, відповідно, обертаючи прикріплену до них турбіну. Таким чином, кінетична енергія перетворюється на механічну енергію обертання, передаючи крутний момент через з'єднаний з генератором вал, що призводить до виробництва електричної енергії на основі електромагнітної індукції.



Рисунок 2.7 – Вітрогенератор LT20KW зі сторони обертового механізму

Кількість виробленої енергії визначається розмірами турбіни та довжиною її лопатей. Для управління процесом зарядки акумуляторних станцій, між вітрогенератором і батареями встановлюється контролер заряду. Цей компонент регулює зарядну напругу і запобігає пошкодженню батарей від перезаряду. За необхідності, надлишкова енергія може бути спрямована на компенсуючий пристрій(наприклад, на великий резистор або електричні нагрівальні елементи для опалення).

Ортогональні ВГ з вертикальною віссю обертання, що використовують підйомну силу крила, мають ККД трохи нижчий, ніж у пропелерних, але їхня ефективність все ж висока. Однак у вертикально-осьові турбіни не можуть самостійно запустити обертання і потребують додаткового приводу – або від акумуляторів, або від іншої вітротурбіни з початковим обертовим моментом.

ВГ із горизонтальною віссю обертання, що має дві або три лопаті, встановлені на вершині щогли – найпоширеніший тип вітроустановок. Сучасні горизонтальні ВГ являють собою установку, яка служить для переробки кінетичної енергії вітру в механічну енергію за допомогою лопатей, а потім в електричну за допомогою електричного генератора. Для побутового використання, як правило, встановлюється один ВГ, під'єднаний до системи домашнього електропостачання, яка містить також накопичувальні акумулятори.

Конструкцію ВЕУ з горизонтальною віссю представлено на малюнку 2.8. Основними частинами ВЕУ є щогла і встановлена на ній гондола, в якій знаходяться всі інші елементи.

Елементи вітрогенератора:

1) Вітроколесо (до нього входять лопаті та маточина);

2) Вал турбіни (низькошвидкісний вал);

3) Вал генератора (високошвидкісний вал);

4) Редуктор, що механічно з'єднує вал генератора з валом турбіни;

5) Електрогенератор;

6) Контролер, що керує роботою електрогенератора;

7) Флюгер, що орієнтує турбіну за вітром;

8) Анемометр, що вимірює швидкість вітру;

9) Гальмо, що служить для зупинки турбіни в критичних ситуаціях(захист від угону).

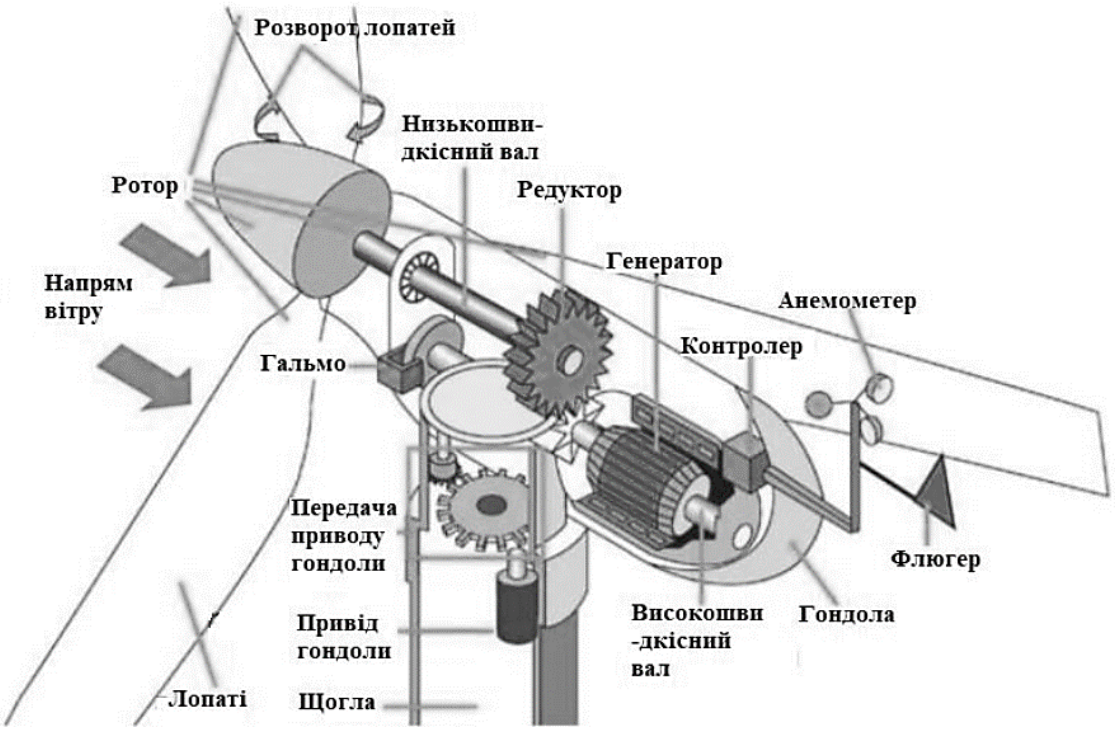


Рисунок 2.8 – Внутрішня будова вітрогенератора

Вертикально-осьові ВТ зазвичай менш ефективні порівняно з горизонтально-осьовими ВТ з таких причин:

1) лопать відчуває опір, оскільки частину траєкторії вона проходить проти напрямку вітру.
2) вертикально-осьові турбіни частіше встановлюються на меншій висоті, де швидкість вітру нижча.
3) вертикально-осьові ВТ схильні до проблем вібрації, як-от шум, прискорений знос і пошкодження опорних конструкцій через турбулентність повітряного потоку на низькій висоті.

Загалом, ККД вітрогенераторів не перевищує 20% при невеликих вітрах. Чим менше потужність, тим гірше показники потужності при середній швидкості вітру (4-5 м/с). В умовах сильних вітрів, які досить змінні, ККД може дійти до значень в 40-50%, але модифіковані (або синхронні) генератори від постійно змінного вітру отримують середнє значення в 30-35%.

2.3.4 Резервний генератор на вуглеводневому палеві

Резервні генератори в АЕУ відіграють допоміжну роль у забезпеченні стабільного та надійного електропостачання, особливо в тих випадках, коли основне джерело виробляє недостатньо електроенергії для споживача, а також, коли електроустановка сама по собі вимагає стартового запасу електроенергії в системі. На рисунку 2.8 показаний дизельний генератор у закритому корпусі. Резервні генератори є практичним компонентом, який компенсує недоліки під'єднаних ВДЕ, але його введення в АЕУ, як і безпосереднє придбання такого генератора значно підвищує сумарну вартість електроустановки.



Рисунок 2.8 – Дизельний генератор Grupel G0100GRGR потужністю 80 кВт

Звертаючи увагу на енергетичний масштаб АЕУ середніх потужностей, комплекс із резервних генераторів можуть стати чудовою альтернативою для забезпечення споживача електроенергією, адже генеровану потужність можна

легко регулювати, змінюючи певну кількість працюючих генераторів у «локальній» енергомережі.

Одним з основних недоліків генераторів на паливі є значні викиди парникових газів та інших шкідливих речовин. Згідно з даними Агентства з охорони навколишнього середовища США[10], середній дизельний генератор потужністю 500 кВт викидає в атмосферу близько 9 кг CO_2 за годину роботи. Навіть невелика кількість викидів сприяють парниковому ефекту, що завдає шкоди екосистемам. Крім вуглекислого газу, в атмосферу надходять оксиди азоту (NO_2), сірчистий газ (SO_2) і тверді частинки, які спричиняють погіршення якості повітря. Крім того, робота генераторів на паливі супроводжується гучним шумом. Забруднення ґрунту і водойм є ще однією проблемою, пов'язаною з використанням генераторів на паливі. Витоки або аварійні розливи нафтопродуктів, що використовуються в цих генераторах, можуть призвести до значного забруднення навколишнього середовища. Тому поставка та зберігання великої кількості палива для забезпечення АЕУ необхідним об’ємом енергоресурсів, з екологічної точки зору, має дотримуватись ряду правил щодо неприпустимості виникнення витоків. Потрібно зберігати особливу пильність у дотриманні безпеки біля заповідників, або на аграрних підприємствах, де будь-який забруднювальний продукт може непомітно, але у ненульових кількостях, потрапити шкідлива речовина на території із споживним потенціалом, або у поживний об'єкт (рослина або тварина). Навіть далеке розташування резервних станцій з паливними комірками не гарантує ізольованість органічних споживаних зон від забруднення.

Попри негативні екологічні наслідки, генератори на паливі мають низку значних переваг. Вони забезпечують надійне енергопостачання в критичних ситуаціях, що особливо важливо для медичних закладів, дата-центрів та інших об'єктів, де безперервне електропостачання вкрай необхідне.

Якщо до автономної електроустановки з використанням ВДЕ додається резервний генератор, тоді таку електростанцію називають гібридною або

автономно-гібридною, підкреслюючи цим введення технологічного нюансу в систему.

2.4 Акумуляторна система

Акумулятор для АЕУ є основним компонентом системи зберігання енергії, що забезпечує надійне електропостачання споживачів за відсутності або за нестачі генерації електроенергії з відновлюваних джерел. Основне завдання акумулятора полягає в накопиченні надлишкової енергії, що виробляється генераторами установки в періоди високого вироблення, і подальшій її віддачі в мережу або безпосередньо споживачам у періоди низького вироблення, наприклад, у нічний час або за відсутності вітру, або за введений спеціальний режим роботи.

Сучасні акумулятори для таких установок, наприклад, літій-іонні або свинцево-кислотні, характеризуються високою ємністю і здатністю підтримувати стабільну напругу на виході протягом тривалого часу. Вони мають бути оснащені системами управління зарядом, які запобігають глибокому розряду, здатному викликати незворотні пошкодження і значне зниження терміну служби акумулятора.

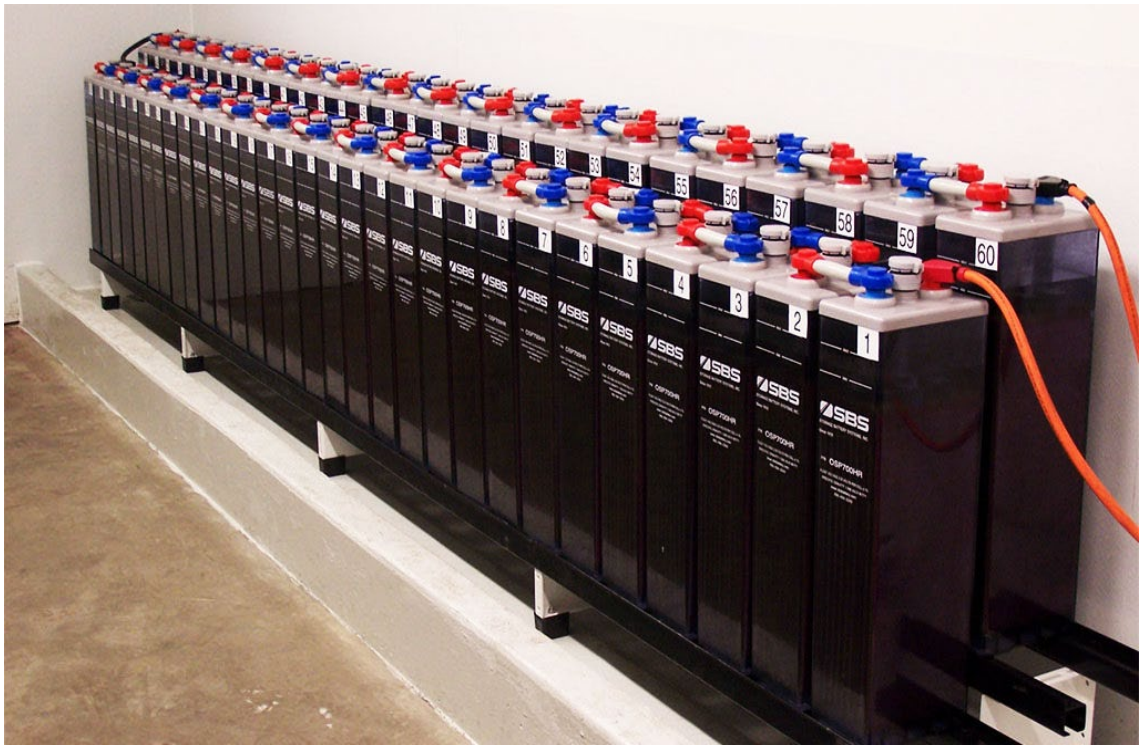


Рисунок 2.9 – Акумуляторна система для автономної електроустановки знаходиться у закритому приміщені із помірною температурою

Акумуляторні батареї для акумуляторних систем автономних електроустановок поділяються на кілька типів, кожен з яких має свої особливості та сферу застосування. Основні типи включають свинцево-кислотні акумулятори, нікель-кадмієві акумулятори, літій-іонні акумулятори та акумулятори на основі проточних батарей. Свинцево-кислотні акумулятори (особливо гелеві та AGM–Absorbent Glass Material) є найпоширенішими завдяки низькій вартості та надійності, вони ідеальні для невеликих автономних систем із помірними вимогами до ємності та циклічності. Нікель-кадмієві акумулятори вирізняються високою довговічністю та стійкістю до екстремальних умов, що робить їх придатними для використання в суворих кліматичних умовах і системах із високими вимогами до надійності. Літій-іонні акумулятори, відомі своїм високим ККД (табл. 2.2) і щільністю енергії, є найкращим вибором для систем, що вимагають компактних рішень з великою кількістю циклів заряд-розряд, таких як сонячні електростанції та мобільні автономні пристрої. Проточні акумулятори, незважаючи на складнішу

конструкцію, пропонують можливість масштабованого зберігання великих обсягів енергії та підходять для великих об'єктів, які потребують надійного довгострокового накопичення і використання енергії, наприклад, вітряні та сонячні ферми.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики АКБ за типом

Тип акумулятора	ККД (%)	Енергоємність (Вт·год/кг)	Експлуатаційні цикли (n·1000)	Час розрядки (год)
Свинцево-кислотний (Pb-Acid)	70-85	30-50	0,5-1	4-8
Нікель-кадмієвий (Ni-Cd)	60-80	50-70	1,5-2	3-5
Літій-іонні (Li-ion)	90-95	150-200	3-5	1-3
Проточні (V/VRB)	75-85	40-80	5-10	5-10

2.5 Інвертор

Інвертор у складі автономних електроустановок відіграє ключову роль, здійснюючи перетворення постійного струму, що генеруєтьсяфотомодулями або іншими джерелами, на змінний струм, який використовують більшість побутових і промислових споживачів. Основною функцією інвертора є не тільки перетворення струму, а й забезпечення стабільності напруги та частоти в мережі, контроль та управління енергопостачанням. У автономних системах існує декілька способів підключення інверторів: вони можуть бути з'єднані безпосередньо з генераторами постійного струму (як у випадку з сонячними панелями), або інтегровані в систему через акумуляторні блоки, забезпечуючи буферну функцію для вирівнювання навантажень. Інвертори також можуть бути підключені через контролери заряду, які оптимізують процес заряджання акумуляторів та запобігають їх перевантаженню(рис. 2.10). Крім того, є

можливість підключення інверторів до мережі змінного струму для синхронізації з іншими джерелами енергії або для передачі надлишків енергії до централізованої мережі, якщо автономна установка передбачає таку функцію.

Інвертори в автономних електроустановках різняться за типами та функціональними характеристиками, від яких залежить їх ефективність і придатність для конкретних застосувань.

Інвертори для АЕУ:

- Синосуїдальні інвертори генерують чистий змінний струм з синусоїдальною формою хвилі. Ці інвертори найбільш схожі на стандартний мережевий струм і підходять для всіх типів споживачів, включаючи чутливі електронні пристрої. Синусоїдальні інвертори зазвичай використовуються в якості основного джерела електропостачання в автономних системах.
- Модифіковані синусоїдальні інвертори виробляють змінний струм зі спрощеною (або модифікованою) синусоїдальною формою. Ці інвертори менш дорогі у виробництві, але не підходять для всіх типів навантаження. Вони можуть працювати з більшістю побутових приладів, але для чутливих апаратів (наприклад, деяких видів моторів або лікарського обладнання) не рекомендуються.
- Високочастотні інвертори забезпечують значно вищу ефективність перетворення енергії за рахунок використання високочастотних технологій. Ці інвертори зазвичай мають менший розмір і вагу, а також можуть працювати на вищих напругах, що знижує втрати в проводниках. Вони підходять для використання в системах, де важлива компактність і енергоощадність.

Кожен тип інверторів має свої особливості і обмеження, які потрібно враховувати при виборі для конкретної автономної електроустановки. Важливо враховувати типи споживачів, які будуть підключені до системи, а також потужність і напругу, яка необхідна для задоволення потреб навантаження.

Ефективність інверторів, особливо у випадку з ФЕС, залежить від точності налаштування на максимальну точку живлення (MPPT), що дозволяє максимально ефективно використовувати енергію сонячних панелей навіть за змінних умов освітлення. Багатоканальні MPPT інвертори особливо корисні для систем із неоднорідними масивами сонячних панелей, забезпечуючи максимальну гнучкість і ефективність. У випадках з великими СЕС, такі інвертори забезпечують високу ефективність до 98%, що робить їх ідеальними для АЕУ середньої та великої потужностей, а їхня здатність до гнучкої конфігурації дозволяє використовувати ці інвертори як для автономних, так і для адаптивних електроустановок.

Вихідна напруга автономних інверторів у більшості випадків становить 220 В (50/60 Гц), але в інверторах потужністю 10-100 кВт можна отримувати трифазну напругу 380 В [11].

Інвертори можуть бути оснащені системою примусової вентиляції, оскільки під час перетворення енергії виділяється значна кількість тепла. Одним з ключових показників якості інвертора є наявність кількох режимів роботи вентилятора для активного охолодження. При невеликому навантаженні, коли тепловиділення мінімальне, вентилятор не працює, що сприяє додатковій економії енергії та підвищує загальну ефективність сонячної електростанції. У міру зростання потужності інтенсивність роботи вентилятора повинна відповідно збільшуватися, щоб забезпечити належне охолодження інвертора.

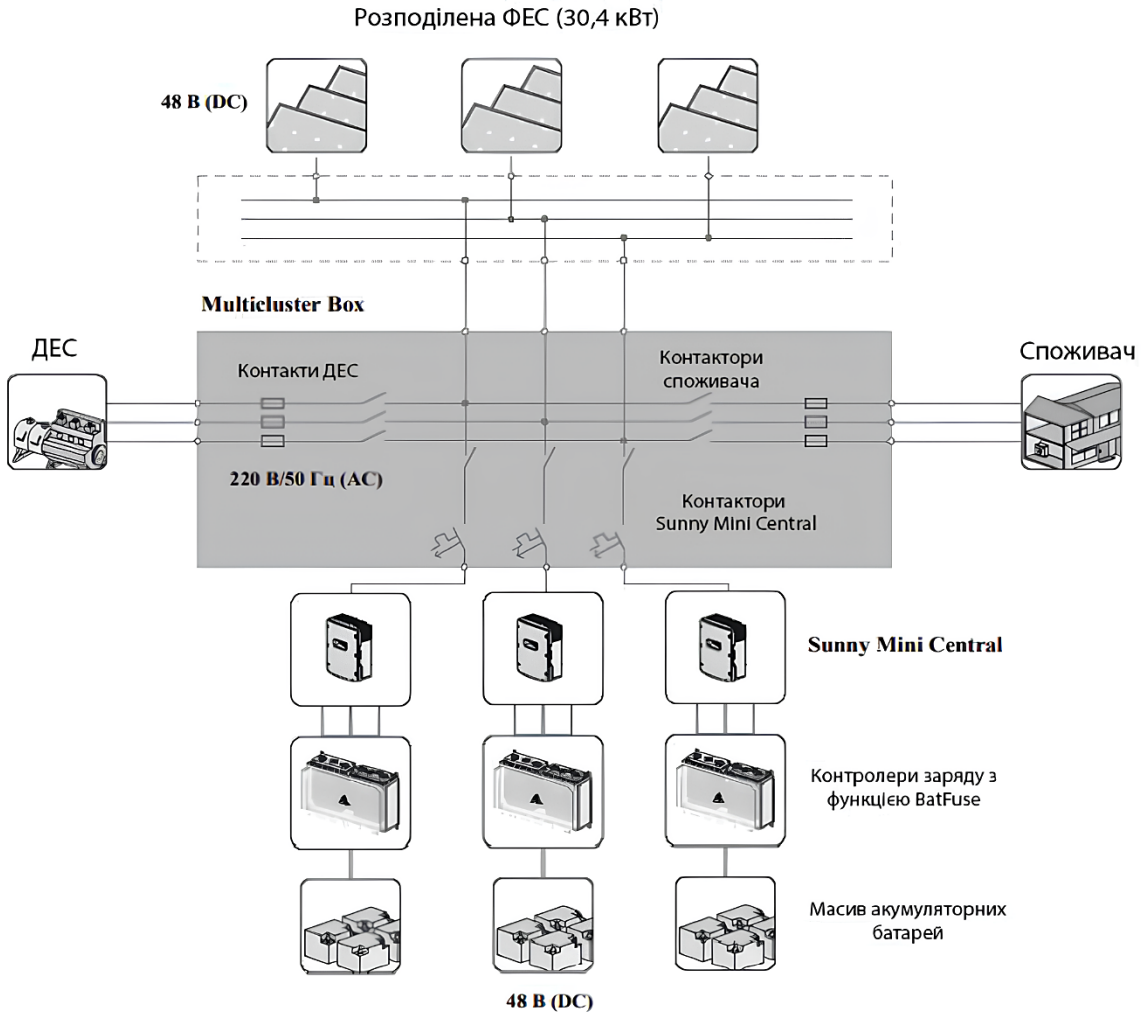


Рисунок 2.10 – Спростована електрична схема автономно-гібридної електроустановки

Ефективна система вентиляції не тільки подовжує термін служби інвертора, запобігаючи його перегріву, але й знижує ризик відмови та підвищує загальну надійність системи. Крім того, вдосконалені системи охолодження з інтелектуальним керуванням можуть автоматично регулювати інтенсивність охолодження відповідно до температурних умов, що додатково оптимізує енергоспоживання.

2.6 Контролер заряду

Контролер в автономних електроустановках є ключовим елементом управління, відповідальним за координацію роботи різних компонентів

системи. Він забезпечує моніторинг і управління енергетичними процесами, включно із зарядом і розрядом АКБ, регулюванням роботи інверторів, усіма фотомодулями або по окремості, та іншими джерелами енергії, що з'єднані зі схемою АЕУ. Контролери використовують різноманітні алгоритми і програмне забезпечення для оптимізації роботи системи, мінімізації втрат і підвищення її ефективності.

Існують різні типи контролерів залежно від специфіки енергосистеми: PWM (широтно-імпульсна модуляція), контроль технології MPPT, а також розумні контролери, здатні адаптуватися до мінливих умов довкілля та споживчих характеристик.

Сьогодні можна часто зустріти поєднані контролери з інверторами в один цілісний агрегат, що дає змогу скоротити втрати енергії та поліпшити координацію роботи пристроїв, оптимізуючи ефективність системи загалом. Такі комбіновані пристрої часто пропонують розширені функціональні можливості та спрощене управління, що робить їх кращими для сучасних автономних енергетичних систем.

Не зважаючи на окремість обох приладів у принциповій схемі (рис. 2.1), вони можуть розглядатись і як об'єднаний тип, бо на входах приладу, використовується той же самий принцип розподілу електроенергії.

2.7 Споживач

Електричне навантаження споживачів залежить від виду виробництва, режиму робочого дня і числа змін. Наочне уявлення про характер зміни електричних навантажень в часі (зміна, доба, місяць, рік) дають графіки навантажень. Від певного електричного навантаження визначають тип споживача (табл. 2.3).

Побутові споживачі, як правило, характеризуються змінним споживанням протягом дня, з піковими навантаженнями вранці та ввечері, коли

використовується деяка кількість електричних приладів (освітлення, побутова техніка, опалення та охолодження).

Комерційні споживачі (магазини, офіси, ресторани і т.д.) мають більш рівномірний графік споживання протягом робочого дня, з піковим навантаженням під час відкриття та роботи підприємства.

Промислові підприємства часто мають стабільне і високе споживання електроенергії, особливо у виробничі зміни. Піки споживання можуть виглядати як різкі підйоми та спади об’єму споживання, виникати залежно від виробничого процесу та використання важкого обладнання.

У таблиці 2.3 наведена загальна характеристика споживачів за їх типами. Завдяки такому формальному позначенню, можна відвести споживача до певного типу задля введення певного режиму роботи АЕУ на програмному рівні. Так, якщо до установки буде під’єднано, наприклад, два споживача різних типів, можна виділити, який конкретний споживач використовує електроенергії більше запланованого.

Таблиця 2.3 – Графіки споживання за типом споживача

Тип споживача	Пік навантаження	Зниження споживання
Побутовий споживач	Ранкові та вечірні години	Денний і нічний час
Комерційний споживач	Робочі години (9:00-18:00)	Вечірні та нічні години
Промислове підприємство	Час роботи виробничих ліній	Нічні зміни або вихідні дні

У роботі над розрахунками, графіком навантаження називається крива, що показує зміну навантажень за певний проміжок часу. За родом навантаження розрізняють графіки активного і реактивного навантаження, за тривалістю – добові і річні графіки навантажень. Кожен тип споживача має свій характерний графік навантажень, який визначається технологічним процесом або режимом життєдіяльності людини. Якщо відкладати по осі абсцис години доби, а по осі ординат споживану в кожен момент часу потужність у відсотках від максимальної потужності, то отримаємо добовий графік навантаження.

Добовий графік навантаження: Найбільше можливе за добу навантаження приймається за 100%. При відомому розрахунковому максимумі навантаження P_{max} можна перевести типовий графік (Р, %) у графік навантаження даного промислового споживача в значенні активної потужності (Р, кВт)[12].

$$P_j = \frac{n\% \cdot P_{max}}{100\%}$$

де P_j – потужність навантаження в певний час доби, кВт;

$n\%$– ординатавідповідної ступені типового графіка, %;

P_{max}– максимальне навантаження, кВт.

Потім по добовому графіку навантаження визначають:

– добова витрата енергії:

$$W_c = \sum_{i=1}^{24} P_j \cdot t_i$$

де *t* – тривалість *i*-ої ступкні добового графіка, год;

– Середньодобове навантаження:

$$P_{cp} = \frac{W_c}{24}$$

– коефіцієнт заповнення графіка навантажень $K_{зг}$ характеризує ступінь нерівномірності режиму роботи АЕУ:

$$K_{зг} = \frac{P_{cp}}{P_{max}} = \frac{W_c}{24P_{max}}$$

Для планування річного споживання і вироблення електроенергії складають річні графіки навантаження за тривалістю і річні графіки зміни добових максимумів навантажень.

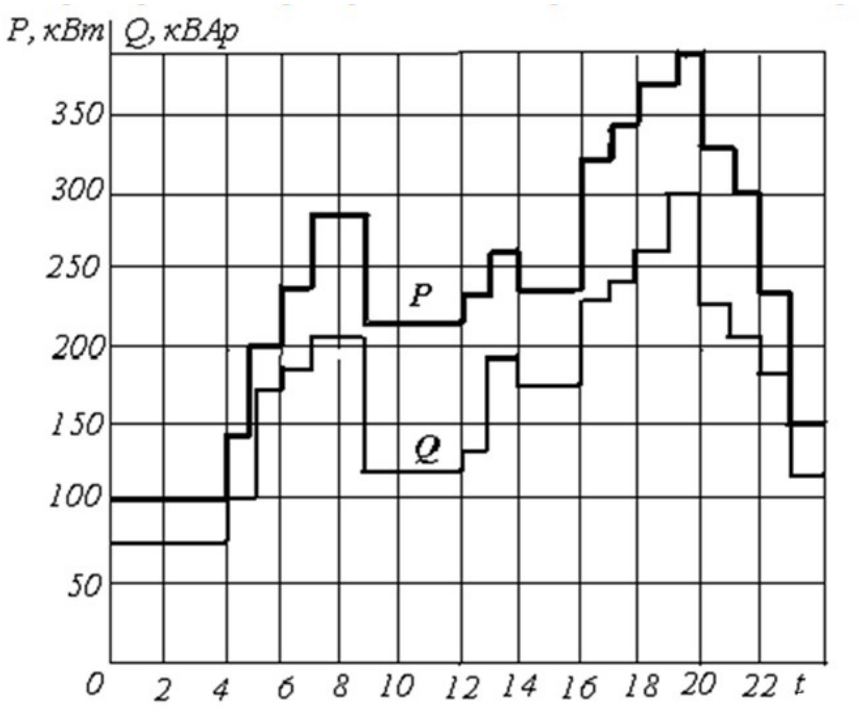


Рисунок 2.11 – Приклад добового графіку активного та реактивного навантажень

Річний графік навантаження: Для побудови необхідні дані за характерними добовими графіками двох найбільш завантажених днів в році-зимового і літнього, а при найбільш точній побудові ще й весняно-осінній графік навантаження.

Для більшої частини України можна умовно прийняти тривалість зимового періоду – 213 днів (жовтень-березень), літнього – 152 дні (квітень-вересень). На осі ординат річного графіка за тривалістю у відповідному масштабі відкладають навантаження в кВт от значень P_{max} до P_{min}, а по осі абсцис в масштабі-години року від 0 до 8760 год. (365 днів на рік по 24 години на добу: $24 \cdot 365 = 8760$ год).

Зазвичай для кожного споживача в довідковій літературі наводиться кілька добових графіків, що характеризують роботу підприємства в різний час року і в різні дні тижня. Найчастіше використовуються графіки зимових і літніх діб. Максимальне навантаження зимового добового графіка P_{max} приймається за 100%. Ординати всіх інших ступенів графіка задаються у відсотках щодо

цьогозначення. За річним графіком навантаження можна визначити деякі коефіцієнти, що характеризують режим роботи підприємства.

Річна витрата активної електроенергії, за розглянутий період часу для підприємства дорівнює площі річного графіка:

$$W = \sum P_i \cdot t_i$$

де W – витрата активної електроенергії, кВт·год;

$P_i \cdot t_i$– потужність (кВт) та тривалість часу (год) *i*-того ступеню графіка.

Число годин використання максимуму активної потужності можна визначити і за річним графіком активних навантажень:

$$T_M = \frac{W}{P_{max}}$$

$T_М$–значення по кількостях годин на рік, в якихАЕУ повинна була б працювати з незмінним максимальним навантаженням, щоб спожити дійсно спожиту за рік кількість електроенергії, тобто:

$$T_М = К_{зг} \cdot 8760$$

Середнє навантаження за рік:

$$P_{ср} = K_{зг} \cdot P_{max}$$

Річний графік навантаження може бути побудований аналогічно добовому графіку, тобто за середніми потужностями, але не за 30, 60 хв, а за місяць(рис. 2.12).

Частіше будують річні графіки за тривалістю. Такий графік являє собою криву зміни спадного навантаження протягом року (8760 год). Річний графік за тривалістю (рис. 2.12, б) можна побудувати за річним графіком, побудованим за середніми місячними потужностями (рис. 2.12, а) або двома характерними добовими графіками навантаження за зимову й літню добу.

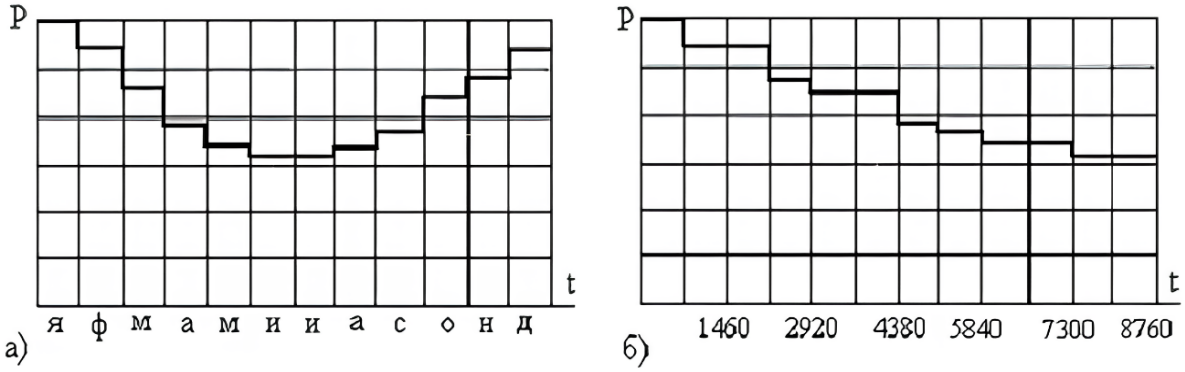


Рисунок 2.12 – Річний графік зміни активної потужності: а – за середніми місячними потужностями; б – за тривалістю

Споживачі підключаються до мережі через секції живильних ліній, які мають активно-індуктивні параметри. Довжина ліній передачі обмежується максимально допустимим відхиленням напруги на кінцевих споживачах від номінального значення. Відповідно до ДСТУ[13], граничне допустиме відхилення напруги не повинно перевищувати 10%. Таким чином, довжина лінії залежить від таких відомих факторів, як питомий опір провідника та величина переданого навантаження. Споживання електроенергії може бути контрольованим або введенням певного режиму споживання, або технічними засобами, або задіянням диференційних тарифів [4].

Автономна електроустановка надавати енергію споживачу за умови, що його енергоспоживання не перевищує виробленої енергії. Споживачі електроенергії можуть працювати постійно або періодично, але також необхідно розглядати тип споживача. Побутовий споживач є найчастішим споживачем, який більше за всі інші типи має можливість забезпечення автономною електричною системою, оскільки, наприклад, технологічні підприємства розташовуються ближче до електромережі та їхнє забезпечення в електроенергії стоїть у пріоритеті, ніж, житлові комплекси, але це не виключає введення додаткових електричних установок.

Комерційних та побутових споживачів можна масштабувати, у тому сенсі, що побутові електричні прибори, за їх пряме використання по наданому функціоналу, дають навантаження у часових рамках. Хоча й використання

окремого фізичного споживача математично виглядає як сума ймовірностей використання окремих приборів, але при розгляді графіку споживання,можна розглянути періодично працюючі навантаження, що поділяються на фіксовані та плаваючі за часом (наприклад, постійно працюючий холодильник та увімкнення електричних чайників, мікрохвильовок в обідні години). Ігнорування цих факторів може призвести до завищення вихідної потужності, і як наслідок, подорожчання АЕУ від встановлення доповненого обладнання, що може бути неоптимальним і недоцільним рішенням. Тому необхідно коректно визначити вихідну потужність такої установки, склавши графік добової зміни навантаження, що відображає сумарну потужність всіх споживачів у кожен момент часу. Важливо унеможливити одночасну роботу потужних приладів і оптимізувати підключення навантажень так, щоб мінімізувати вихідну потужність АЕУ. Наприклад, СВЧ-піч слід вмикати тільки після завершення роботи електрочайника. Оскільки точне визначення інтервалів для навантажень із плаваючим часом роботи є важким, такі навантаження приймаються як постійно діючі.

Такі електроприлади, як холодильник, насоси, електродриль і низка інших, у момент пуску споживають потужність, що в 5-6 разів більша за «паспортну». Якщо таких споживачів з високою потужністю досить багато, то це може призвести до збільшення вихідної потужності. У цьому разі доцільно унеможливити одночасне вмикання таких електроприладів і здійснити споживання пускових потужностей від акумуляторних батарей.

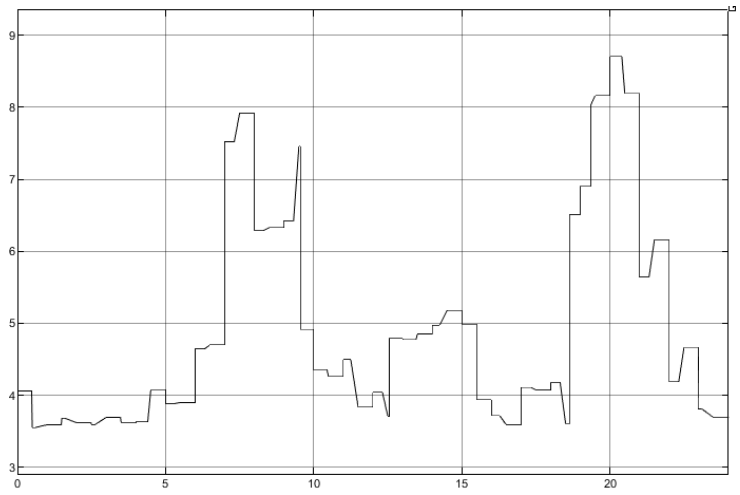


Рисунок 2.10 – Приклад добового графіку побутового споживача

Для розрахунку графіку споживання промисловим підприємством, у якості безпосередніх електроспоживачів виступають електричні прилади в будівлях, або машини на відкритому повітрі. В таблиці 2.4 наведений приклад встановленої потужності, що перенесені на окремі часові рамки доби (ранок, день, вечір, ніч), коли які використовується електроенергія.

Таблиця 2.4 – Приклад електроспоживання підприємством

Будівля	Встановлена потужність, кВт	Споживана потужність за годинами, кВт				Споживання електроенергії кВт-год
		7-9 годин	9-19 годин	19-24 годин	0-7 годин	
Адміністративний корпус	15	18	120	0	0	138
Побутовий корпус	25	25	25	25	0	268,8
Котельня	35	35	35	35	0	490
Цех первинної сировини	15	30	150	75	105	360
Сушарня	130	0	0	0	910	910
Виробничий цех	150	75	1095	300	0	1470
Склад готової продукції	20	40	200	100	140	480
Сумарна потужність		277	2020	665	1155	4117

Як видно з таблиці 2.4, в даному підприємстві введений строгий режим роботи, в якому кожна будівля виконує певний технологічний процес, завдяки чому можна підготувати прогнозуючий графік споживання (рис. 2.11).



Рисунок 2.11 – Прогнозуючий графік споживання підприємства. Встановлена потужністьякого дорівнює 3 МВт та денне споживання дорівнює близько 10МВт

2.8 Висновки з розділу 2

Технічні характеристики та розташування автономної електроустановки залежать від фізичних значень навколишнього середовища. Такі фактори, яктемпература, погодні умови та інтенсивність сонячного випромінювання, мають прямий вплив на роботу систем генерації та зберігання енергії.

Фотовольтаїчні системи характеризуються стабільною і передбачуваною генерацією енергії у світлий час доби, оскільки навіть у неясну погоду на поверхню стабільно потрапляє сонячна радіація. ФВС найефективніші в сонячні дні і можуть забезпечити постійне електропостачання за належного накопичення енергії. На відміну від них, вітрогенератори сильно залежать від швидкості вітру та турбулентних потоків, що призводить до нерегулярної генерації енергії. Вітер може бути непостійним і змінним, що спричиняє значні коливання у вихідній потужності генераторів. Це робить ФВС більш

передбачуваними і надійними для планування енергоспоживання, в той час як ВГ вимагають додаткових заходів для стабілізації електропостачання.

Резервний генератор, що працює на вуглеводневому паливі, на прикладі дизельних або бензинових, може стати надійним допоміжним агрегатом в АЕУ. Він забезпечує безперервність електропостачання у випадках, коли поновлювані джерела енергіїне можуть забезпечити необхідну потужність. Проте, слід враховувати, що використання таких генераторів пов'язане з викидами парникових газів та доставки палива. Економічна доцільність також важлива: витрати на паливо і технічне обслуговування генераторів можуть значно збільшити загальну вартість експлуатації АЕУ.

В автономних електроустановках акумуляторні системи відіграють ключову роль у забезпеченні стабільного енергопостачання. Їхнім основним завданням є накопичування згенерованої енергії, що генерується відновлюваними джерелами, і забезпечення її безперебійного споживання в періоди, коли генерація неможлива або недостатня. Правильний вибір та експлуатація АКБ є критичними для ефективної роботи системи. Необхідно враховувати такі параметри, як ємність батарей, термін їхньої служби, ефективність заряджання та розряджання, а також умови експлуатації. Якісні акумулятори здатні забезпечувати високу надійність і довговічність автономної системи, мінімізуючи при цьому втрати енергії та витрати на технічне обслуговування.

Графіки енергоспоживання можна відносно точно прогнозувати на основі звичок і потреб споживачів. Наприклад, домашні господарства споживають більше електроенергії в ранкові та вечірні години, а підприємства – у робочий час. Однак на графіки споживання значний вплив мають зовнішні чинники, такі як погодні умови, святкові дні та аварійні ситуації. Ці зміни можуть призводити до різких стрибків або падіння попиту на електроенергію, що спричиняє необхідність у коригуванні режимів роботи автономних систем. Непередбачувані зміни у споживанні можуть призвести до надлишкового

навантаження на систему або, навпаки, до недостачі у використанні генерованої енергії, що вимагає гнучкості та адаптації системи управління енергією.

Технології на основі відновлюваних джерел енергії активно розвиваються і стають дедалі поширенішими. Проте, вони поки що не можуть повністю задовольнити потреби в електроенергії в масштабах промислових або великих житлових об'єктів. Основні проблеми полягають у низькій щільності енергії, високій вартості встановлення та обслуговування, а також залежності від природних умов. До того ж, коефіцієнт ККД більшості сучасних систем на ВДЕ залишається відносно низьким, що призводить до необхідності використання великих площ і значних капіталовкладень. Таким чином, для забезпечення достатнього рівня енергопостачання потрібне поєднання декількох джерел енергії та застосування ефективних методів їхньої інтеграції та управління.

3. МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЗА РАХУНОК ВДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУРНОГО СКЛАДУ АЕУ

3.1 Порівняльний аналіз визначення «енергоефективність»

Енергоефективність для електричних систем полягає у здатності цих систем мінімізувати втрати енергії при її перетворенні, передаванні та використанні, забезпечуючи при цьому необхідну якість електроенергії та стабільність роботи. Це означає оптимальне використання електричної енергії, коли на виробництво, передачу і використання електрики витрачається мінімально можлива кількість ресурсів і засобів, без шкоди для продуктивності і надійності системи. В електричних системах це досягається шляхом впровадження технологій і методів, які знижують споживання енергії, зменшують втрати під час передачі та підвищують загальну ефективність роботи обладнання.

Ключові аспекти енергоефективності електричних систем включають:

- використання енергоефективного обладнання;
- оптимізація роботи, що включає в себе регулювання навантажень, застосування методів управління та автоматизації для мінімізації втрат і підвищення ефективності роботи всієї системи;
- використання матеріалів і технологій, які зменшують опір і втрати під час передачі електрики, тим самим знижує енергетичні витрати;

Державні стандарти в галузі енергоефективності регламентують вимоги до зниження енергоспоживання та оптимізації використання енергетичних ресурсів. ДСТУ 50001 [14] визначає вимоги до систем енергетичного менеджменту, спрямованих на постійне поліпшення енергетичної продуктивності та підвищення енергоефективності в різних секторах економіки. Цей стандарт містить положення щодо розроблення та впровадження систем управління енергією, які допомагають підприємствам і організаціям покращувати свої енергетичні показники та знижувати витрати на енергоспоживання.

Основні положення стандартів включають:

- зниження енерговитрат на виробництво продукції або надання послуг;
- впровадження обладнання та технологій, які дають змогу мінімізувати енергоспоживання при збереженні або підвищенні продуктивності;
- систематичний контроль за використанням енергії та вжиття заходів щодо його оптимізації;
- досягнення цілей щодо зниження викидів шляхом підвищення енергоефективності та використання поновлюваних джерел енергії.

Ці стандарти сприяють зниженню витрат на енергію, поліпшенню екологічної обстановки та підвищенню конкурентоспроможності підприємств.

3.2 Технічна модернізація фотовальтаїчних систем

Збільшення потужності фотоелектростанцій є критично важливим для забезпечення сталого та екологічно безпечного енергопостачання в майбутньому. Зростання населення та індустріалізація вимагають дедалі більшої кількості електроенергії, що ставить перед суспільством завдання зменшити залежність від викопних джерел палива, які є основними винуватцями викидів парникових газів. Фотоелектричні станції, що перетворюють сонячну енергію на електрику, надають чисте та невичерпне джерело енергії, що особливо важливо в умовах глобального потепління та зміни клімату. Підвищення потужності таких станцій дає змогу не тільки задовольнити зростаючий попит на енергію, а й знизити вуглецевий слід, сприяючи переходу до зеленої економіки. Крім того, збільшення потужності фотоелектростанцій веде до зниження собівартості виробництва електроенергії за рахунок ефекту масштабу, роблячи поновлювану енергію більш доступною для споживачів і конкурентоспроможною порівняно з традиційними джерелами. Це також стимулює розвиток нових технологій у сфері сонячної енергетики, таких як високоефективні фотоелектричні модулі та системи

зберігання енергії, які можуть підвищити надійність і стабільність енергосистеми.

3.2.1 Поглинання сонячної енергії

Ефективність сонячної панелі безпосередньо залежить від кута її нахилу по відношенню до Сонця, оскільки цей параметр визначає кількість сонячної енергії, яку панель може захопити і перетворити на електрику. Максимальну кількість енергії панелі поглинають, коли сонячні промені падають на них перпендикулярно. Оптимальний кут нахилу варіюється залежно від географічного розташування і пори року, оскільки положення Сонця на небосхилі змінюється щодня і сезонно. Наприклад, у літній період, коли Сонце піднімається вище, кут нахилу має бути меншим, ніж узимку, коли воно перебуває ближче до горизонту. Неправильний кут нахилу може призвести до значних втрат ефективності, оскільки зменшує кількість сонячної радіації, що потрапляє на поверхню панелі.

Сонячний трекер – пристрій, призначений для відстеження положення сонця і орієнтування несучої конструкції таким чином, щоб отримати максимальний ККД від сонячних батарей. Концепція трекера гранично проста – за кількома датчикам контролер визначає оптимальне положення для фотомодуля і змушує серводвигун повертати платформу з пристроєм в необхідну сторону.

Переваги підвищення виробництва електроенергії завдяки трекерам:

- Застосування трекерів може збільшити виробництво електроенергії майже на 50%.
- Сонячні панелі нагріваються протягом дня, що знижує їхнє вироблення електроенергії більш ніж на 10%. Тому дуже важливо збирати максимальну енергію в першій половині дня, поки панелі не досягли значного рівня перегріву. Трекери допомагають у цьому, оскільки забезпечують ефективне виробництво електроенергії на північному сході та південному сході в

ранкові години. Взимку цей фактор менш актуальний через природне охолодження.

- Сонячний трекер займає менше місця на земельній ділянці. Наприклад, трекер потужністю 15 кВт має опорну площу 12,56 м^2, тоді як фіксована система тієї ж потужності займає площу щонайменше 150 м.
- Трекери взимку не потребують очищення від снігу та льоду. У фіксованих системах це неминуче, а швидко позбутися наслідків крижаного дощу неможливо, тим паче запобігти пошкодженню панелей.
- Фіксовані системи не захищені від руйнування і пошкодження ураганом, сильними опадами (сніг, град, лід). Вбудована в сонячний трекер метеостанція вирішує цю проблему шляхом переорієнтації трекера для мінімізації втрат від несприятливих факторів.

Використання трекерів у фотовальтаїчній системі є безумовним методом підвищення потужності сонячної електростанції.

Перегрів фотомодулів на сонці є однією з основних проблем, що знижують їхню ефективність. При підвищенні температури модулів вище 30°C, які вважаються стандартними умовами тестування, їхня продуктивність починає падати. Кожне збільшення температури на 1°C понад цю позначку призводить до втрати потужності на рівні 0,4-0,5% для кремнієвих модулів і до 0,6% для тонкоплівкових модулів. Наприклад, за температури 45°C, яку легко можна досягти на яскравому сонці, модулі можуть втрачати до 10% своєї номінальної потужності. В умовах спекотного клімату, де температура модулів може сягати 70°C і вище, втрати можуть бути ще значнішими, тому контроль за температурою стає критично важливим для підтримки високої ефективності фотоелектричної системи.

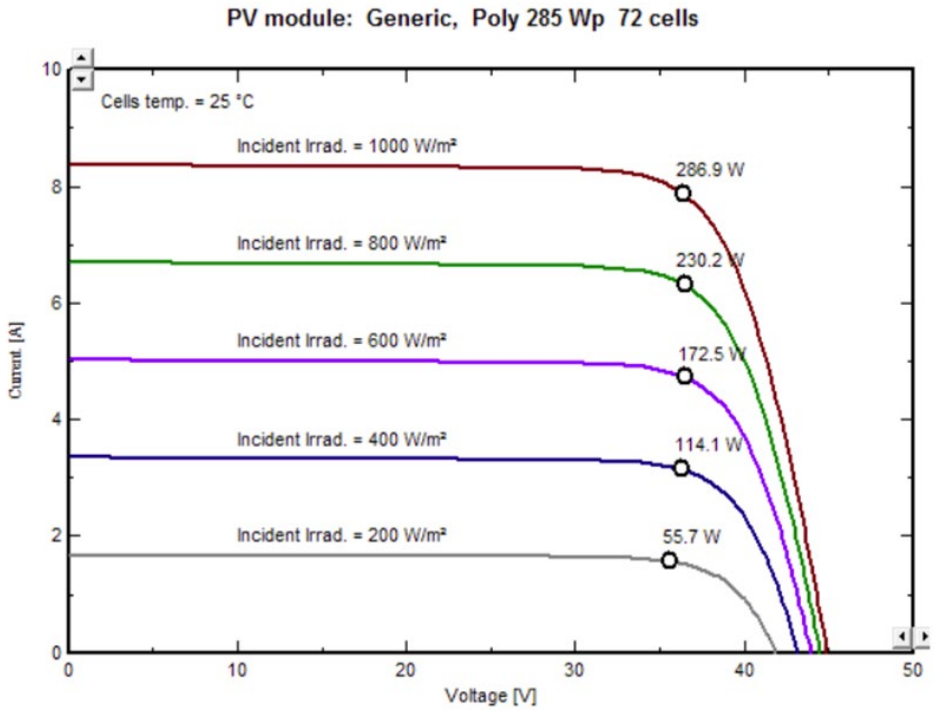


Рисунок 3.2– Вольт-амперні характеристики сонячного модуля за температури 25°C

При підвищенні температури робочої поверхні фотомодулів, ефективність їхньої роботи знижується. Зі зростанням температури зменшується напруга, яку панелі можуть генерувати, що призводить до падіння загальної потужності, особливо в умовах інтенсивного сонячного опромінення і високих температур, характерних для літнього періоду.

Отже, використання термозахисту фотомодуля або постійного охолодження водяними потоками сприятиме збереженню його ефективної роботи. Ще одним варіантом є знаходження оптимального кута нахилу,що може сприяти природному охолодженню панелей за рахунок поліпшеної вентиляції, знижуючи перегрів і збільшуючи продуктивність.

3.2.2 Модифіковані енергоопоглинаючі комірки

Сонячні панелі, виготовлені з використанням технології PERC (Passivated Emitter and Rear Cell), демонструють вищу ефективність порівняно з традиційними панелями як в умовах низької освітленості, так і при високих температурах. Впровадження виробництва PERC не вимагає значних змін у наявних технологічних процесах виготовлення сонячних комірок. Завдяки цьому виробники можуть без великих зусиль та витрат перейти на виготовлення більш ефективних PERC-комірок, зберігаючи конкурентоспроможну вартість продукції.

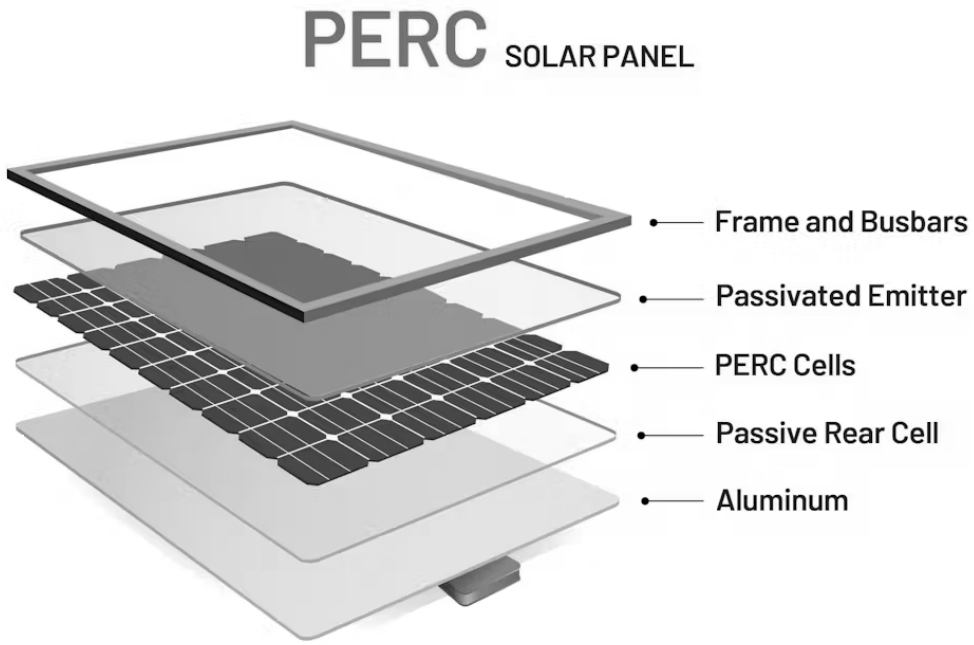


Рисунок 3.3 – будова фотомодуля із PERCтехнологією

Основна відмінність комірок PERC від стандартних монокристалічних фотоелектричних комірок полягає у додаванні пасиваційного шару на задню поверхню. Цей шар забезпечує три переваги, які підвищують ефективність кремнієвих комірок:

1. *Відбиття світла*: Пасиваційний шар на задній поверхні відбиває світло, яке проходить крізь комірку, не поглинаючись, повертаючи його назад до кремнію, що дозволяє фотомодулю повторно поглинати світлові промені, підвищуючи таким чином загальну ефективність.

2. *Зменшення рекомбінації електронів*: Пасиваційний шар знижує ймовірність рекомбінації електронів, що виникає, коли електрони та «дірки» з'єднуються, зменшуючи вихідну потужність панелі. Завдяки цьому збільшується ефективність генерації електроенергії.
3. *Зниження теплопоглинання*: Ще однією перевагою технології PERC є здатність відбивати світло з довжиною хвилі більше 1180 нанометрів (нм). Такі хвилі проходять крізь кремній і зазвичай поглинаються металевими елементами панелі, що створює додаткове тепло. Оскільки підвищення температури знижує ефективність панелей, пасиваційний шар PERC спеціально розроблений для відбиття цих хвиль, що зменшує теплове навантаження і, відповідно, підвищує ефективність роботи панелей.

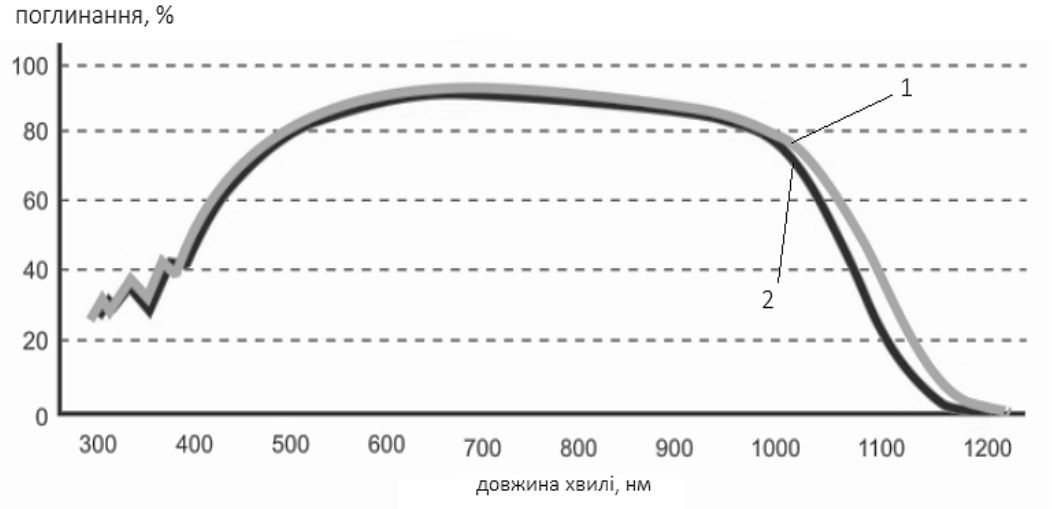


Рисунок 3.4 – Поглинаючаздатність сонячних елементів PERC, де 1) сонячний елемент PERC; 2) сонячний елемент без додаткового покриття

Крім того, технологія Multi Busbar, що використовується у сучасних фотомодулях, передбачає наявність 12 або 16 шин замість традиційних 4, 5 або 6. Це забезпечує наступні переваги:

- збільшення потужності на 2-2,5% залежно від типу комірок і їх ефективності, оскільки більша кількість шин знижує електричний опір;
- коротший транспортний шлях для струму, що зменшує втрати енергії;

– конструкція дроту з високим відбиттям та меншою затіненою площею, що також сприяє збільшенню ефективності панелей.

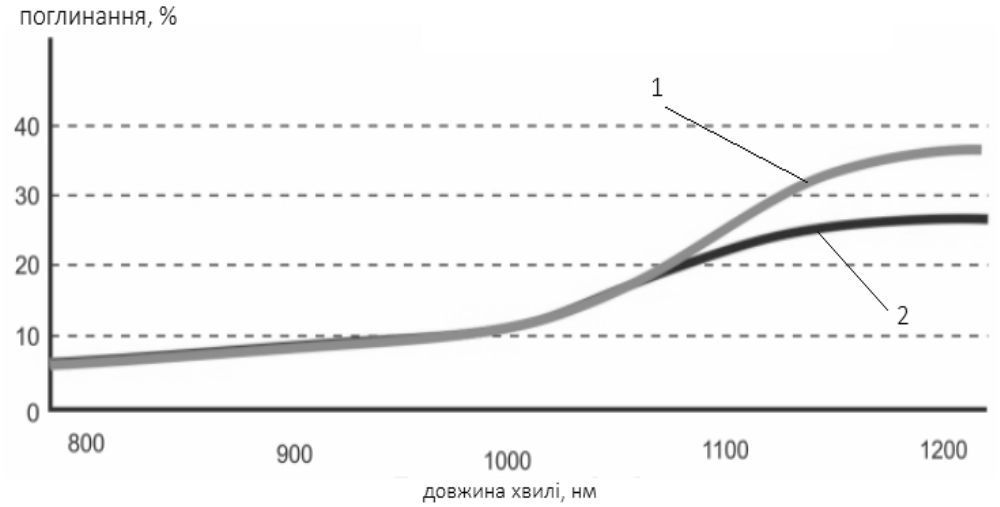


Рисунок 3.5 – Відбивна здатність сонячних елементів, де 1) , де 1) сонячний елемент PERC; 2) сонячний елемент без додаткового покриття

3.2.3 Розрахунок видобутку електроенергії модифікованими фотовольтаїчними системами

Потужність ФВС систем за двома вхідними параметрах температури навколишнього середовища і інтенсивності сонячного випромінювання представлена нижче розраховують таким чином[15]:

$$P_{PV} = \frac{\eta_{PM} \cdot N_{PM} \cdot E_{\text{п}} \cdot \ln(10^6 \cdot E_{\text{п}})}{T_{PM}} \quad (3.1)$$

де P_{PV} – потужність досліджуваної PV системи, кВт;

η_{PM} – постійний коефіцієнт параметрів фотомодулів;

N – Кількість фотомодулів;

$E_{\text{п}}$ – поточний рівень інсоляції, що надходить на похилу поверхню фотомодулів, Вт/м^2;

T_{PM} – температура на поверхні фотомодулів.

Використовуючи дану формулу, можна побудувати графік генерації електроенергії. На рисунку 2.6 показано, як в залежності від інсоляції у 16-ті дні різних місяців можна отримати електроенергію.

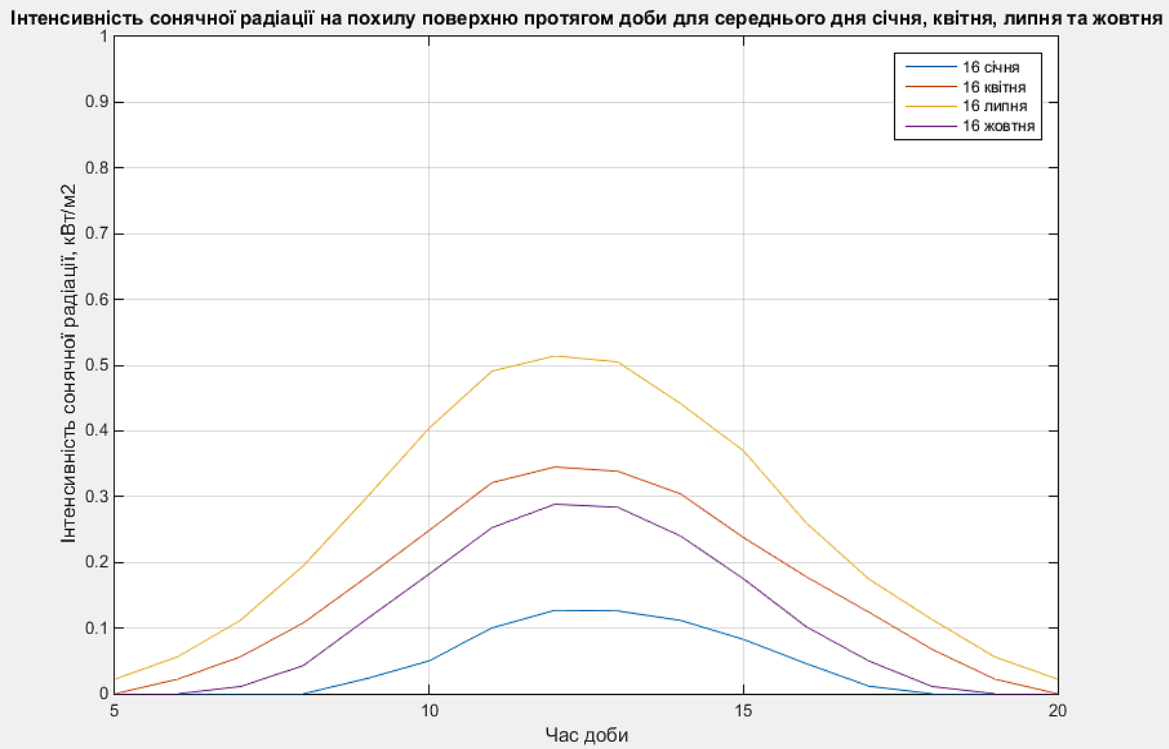


Рисунок 2.6 – Рівень сонячної інсоляції у кВт/м^2 впродовж доби для середніх днів січня, квітня, липня та жовтня

Загальна потужність сонячної електростанції в автономній АЕУ середньої потужності із врахуванням споживання визначають за формулою [16]:

$$P_{\text{сес}} = \frac{30 \cdot W \cdot P_{PV}}{W_{PV}} \tag{3.2}$$

де W – середньодобове споживання електроенергії споживачем, кВт·год;

W_{PV}– кількість енергії, яку виробляє сонячний модуль протягом обраного періоду споживачами, кВт·год, визначається як:

$$W_{PV} = \frac{k \cdot E \cdot P_{PV}}{1000} \tag{3.3}$$

де E– значення інсоляції за вибраний період, кВт·год/м^2;

k– коефіцієнт, який враховує поправку на втрату потужності сонячних елементів при нагріванні на сонці, а також нахил падіння сонячних променів на поверхню модуля протягом дня(влітку $k = 0{,}5$, взимку $k = 0{,}7$).

Повну середньомісячну інсоляцію, кВт·год/(м^2·міс), визначають як:

$$E_{\text{пов}} = E_{\text{с}} \cdot n \tag{3.4}$$

де $E_{\text{с}}$–середньомісячне денне надходження сонячної радіації на горизонтальну поверхню, кВт·год/м^2;

n – кількість місяців.

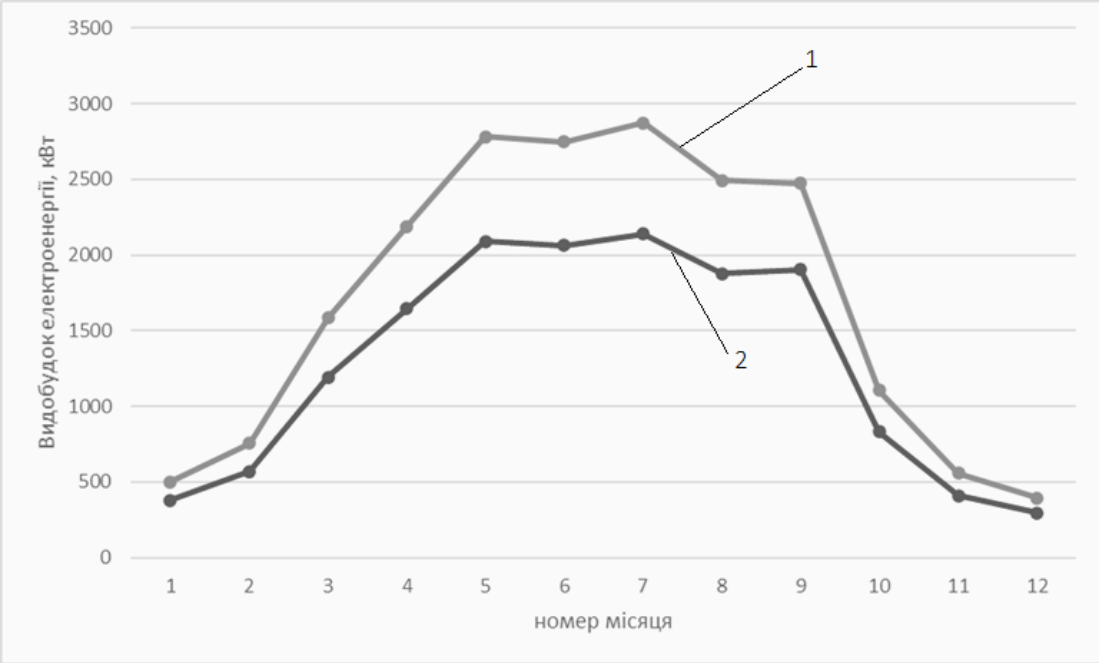


Рисунок 3.1 – Графічне відображення вироблення електроенергії фотомодулями 1) з трекерами; 2) без трекерів

3.3 Підвищення енергоефективності АЕУ за рахунок ВГ

Вихідна потужність ВГ залежить від конструкції лопатей і кінетичної енергії вітру, яка визначається швидкістю вітру V, що проходить через площу поперечного перерізу S [17]:

$$E_{\text{кін}} = \frac{m \cdot V^2}{2} \tag{3.4}$$

де $m = \rho \cdot V \cdot S$; $\rho = 1{,}226$ кг/м^3– щільність повітря, відповідно до нормальних кліматичних умов: $t = 15°C$, атмосферний тиск 101,3 кПа; S – площа вітроколеса горизонтальної осі обертання, за формулою:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \tag{3.5}$$

де D – діаметр вітроколеса.

Якщо в (3.5) підставити значення маси повітря m і захоплюваної площівітроколеса S, отримаємо формулу для визначення механічної потужності ВГ [18]:

$$N_{\text{ВГ}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \xi \cdot D^2 \cdot V^3 \tag{3.6}$$

де $\xi = 0{,}4 \ldots 0{,}45$ – коефіцієнт використання енергії від повітряного потоку.

Електрична потужність ВГ:

$$P_{\text{ВГ}} = N_{\text{ВК}} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{Г}} \tag{3.7}$$

де $\eta_{\text{мех}} = 0{,}8 \ldots 0{,}9$ – механічний ККД вітрогенератора; $\eta_{\text{Г}} = 0{,}7 \ldots 0{,}9$ – ККД вітрогенератора з урахуванням ККД стабілізатора напруги.

Після підстановки всіх зазначених середніх значень коефіцієнтів в (3.7) і (3.3)виходить орієнтовна формула для визначення електричної потужності ВГ:

$$P_{\text{ВГ}} = 0{,}68 \cdot D^2 \cdot V^3 \tag{3.8}$$

З формули видно, що електрична потужність ВГ в основному залежить від діаметра ВК і швидкості вітру. Відомо також, що потужність ВГ також залежить від форми і профілю лопатей.

Розрахунок вітротурбіни зводиться до знання крутного моменту, який він розвиває на рівні ротора, і того, що він витягує потужність від повітряних мас:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_{\text{р}} \cdot C(\lambda, \beta) \cdot v_w^3 \tag{3.9}$$

де P_m – потужність повітряних мас;

ρ – питома щільність повітря;

$S_{\text{р}} = \pi R^2$ – робоча площа лопатей турбіни;R–довжина лопатей;

C – коефіцієнт потужності;

v_w–швидкість переміщення повітряних мас.

Швидкохідність турбіни визначають:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v_w} \tag{3.10}$$

Номінальна швидкохідність λ_n залежить від конструкції ВГ. Синхронна швидкохідність λ_0 визначається при $\mathrm{C} = 0$. Загальне рівняння при значеннях $\lambda_n < \lambda < \lambda_0$,використовується для моделювання характеристик вітрової турбіни у вигляді:

$$C = C_{max} \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_n}\right)^2 \left[-2\left(\frac{\lambda}{\lambda_n}\right) + 3\right] \tag{3.11}$$

Числове значення λ_0 можна розрахувати залежно від σ – параметра, що являє собою суму хорд профілів відносно радіуса Rна периферії вітроколеса і пов’язаний з шириною кінчика лопаті bі числом лопатей i:

$$\sigma = \frac{ib}{R} \tag{3.12}$$

Через σ можна знайти λ_0, яке апроксимується виразом:

$$\lambda_0 = \frac{188{,}93\sigma + 20{,}62}{28{,}22\sigma - 1} \tag{3.13}$$

Звідси визначається обертаючий момент, що діє на вал:

$$M = \frac{P_m}{v_w} \tag{3.13}$$

З формул можна зробити висновок, обертального момент залежить відзначення швидкості вітру.

Потужність ВГ залежить від швидкості переміщення повітряних мас, площі захопленої поверхні та власної ефективності. На вироблення також впливає турбулентність вітропотоку, щільність повітря, рівномірність розподілу швидкості вітру на захопленій площі. Більш значущою технічною характеристикою вітрогенератора є діаметр ротора або вказівка номінальної швидкості вітру, тобто тієї швидкості, за якої установка зможе виробляти свою заявлену потужність. Проведених тестів ВГ малої потужності дають сміливо вказують на те, що цю залежність необхідно враховувати.

Визначено, що максимальну кількість кінетичної енергії можна отримати з вітру, коли швидкість на виході турбіни втричі менша за швидкість вітру[18].

Фактичне вироблення енергії вітрогенератором завжди буде значно нижчим за номінальне. Якщо на виробник замовляє о потужності ВГ – 10 кВт, це означає, що до вітротурбіни встановлено генератор потужністю 10 кВт, при цьому залежність виробляємої енергії від швидкості вітру не вказується, тому, для досягнення заявлюваної потужності необхідно враховувати й інші параметри.

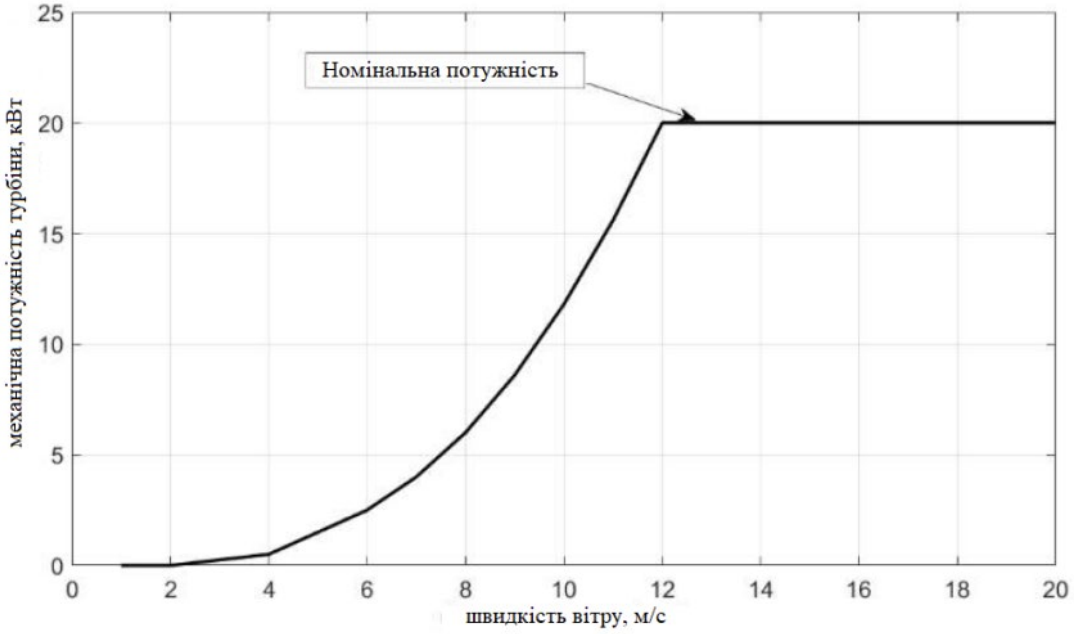


Рисунок 3.4 – Вихідна потужність вітротурбіни 20 кВт

Вітротурбіни проектуються для роботи в певному діапазоні зміни швидкості вітру. Коли швидкість вітру менша за номінальну, зазвичай 12 (м/с), ВТ видає меншу потужність порівняно з номінальною потужністю. Коли швидкість вітру перевищує максимально допустиму швидкість вітру, вітротурбіна повинна обмежити використання енергії, щоб утримувати отриману енергію на максимально допустимому рівні.

В іншому випадку, якщо вітротурбіна генерує занадто багато енергії, перевантаження може пошкодити електричну та механічну систему вітротурбіни.

Відповідно, найкращі типи вітрогенераторів для АЕУ середньої потужності:

- Горизонтально-осьові вітрогенератори є найбільш придатними для діапазону потужностей 10-100 кВт і швидкості вітру 4-15 м/с завдяки своїй високій ефективності та перевіреній технології.
- Вертикально-осьові вітрогенератори також можуть бути ефективними, особливо в умовах змінних вітрів і міських установок, де важливий низький рівень шуму, або замало вільних площ для встановлення великих вітрогенератоів.
- Вітрогенератори зі змінною швидкістю забезпечують кращу адаптацію до мінливих умов вітру і більш стабільне виробництво енергії.
- Вітрогенератори з прямим приводом пропонують високу надійність і ефективність завдяки відсутності редукторів.

Вибір конкретної моделі залежить від специфічних умов встановлення, включно з доступністю простору, вітровими умовами та фінансовими можливостями. Загалом, ККД вітрогенератора може зрости до 30% при повній потужності (номінальної).

3.4 Розрахунок ємності акумуляційних систем

Для ефективного функціонування акумуляторні системи в АЕУ часто включають засоби моніторингу та контролю, що забезпечують оптимальне управління зарядкою і розрядкою, що сприяє підтримці високої енергоефективності та довговічності системи. Такі акумулятори дають змогу забезпечити гнучкість і стійкість енергопостачання, мінімізуючи залежність від зовнішніх енергомереж і скорочуючи експлуатаційні витрати завдяки використанню накопиченої енергії в періоди високої потреби.

Ємність акумуляторних батарей є ключовим параметром, що визначає здатність накопичувати і віддавати електричну енергію, що критично важливо для забезпечення стабільної роботи автономних електроустановок. Ємність показує, яку кількість електричного заряду можна акумулювати за заданої номінальної напруги та як довго батарея зможе живити певне навантаження без підзарядки. В автономних електроустановках ємність батарей має бути ретельно розрахована відповідно до очікуваних енергетичних потреб, щоб забезпечити достатній час автономної роботи і запобігти глибокому розряду, який може знизити термін служби акумуляторів. Ці батареї тісно пов'язані з системою напруги установки, оскільки вони мають бути узгоджені з номінальною напругою генераторів і споживачів, що дає змогу ефективно передавати енергію і мінімізувати втрати. У типовій конфігурації, акумуляторна система підтримує стабільну напругу в мережі, компенсуючи коливання напруги, викликані зміною навантаження або варіаціями в генерації енергії. Для забезпечення довгострокової надійності та ефективності автономної електроустановки важливо стежити за станом АКБ, своєчасно проводити їхнє технічне обслуговування та уникати глибоких розрядів, підтримуючи рівень заряду в межах, рекомендованих виробником.

Нічний час доби на автономних електроустановках характеризується споживанням накопиченої в акумуляторній батареї енергії навантаженням,при чому, будь-який тип споживача,через усталений режим людської діяльності

вдень і вночі, дає змогу використовувати нічний час доби як тимчасову область зменшеного споживання. Енергоємність АКБ визначається як добуток її ємності на номінальну напругу. Ємність показує потенціал батареї за часом, протягом якого вона здатна забезпечувати навантаження за умови повної зарядки, і вимірюється в ампер-годинах. У міру розряду напруга і енергоємність акумулятора знижуються [19].

Витрата енергоємності акумуляторної батареї АЕУ за час живлення навантаження визначається як продукт споживаної навантаженням потужності і часу:

$$\Delta C = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \Delta t = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} (24 - \Delta t_{\text{дв}}) \qquad (3.14)$$

де ΔC–витрата ємності;

Δt – час живлення навантаження, год;

$P_{\text{н}}$ – номінальна потужність навантаження;

$U_{\text{н}}$ – номінальна напруга навантаження;

Щоб продовжити термін служби акумулятора, рекомендується його розряджати не більше ніж на 70-80% від його повної ємності. Ступінь розрядженості акумуляторної батареї автономної електроустановки визначається:

$$S_{\text{р}} = \frac{C_{\text{н}} - C_{\min}}{C_{\text{н}}} \cdot 100\% = \frac{\Delta C}{C_{\text{н}}} \cdot 100\% \qquad (3.15)$$

де $\text{C}_{\text{н}}$ – номінальна ємність.

Виразивши з (3.15) ємність $C_{\text{н}}$ з урахуванням (3.14), отримуємо вираз для визначення необхідної ємності акумуляторної батареї у вигляді:

$$C = \frac{100}{S_{\text{р}}} \cdot \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \cdot \Delta t \qquad (3.16)$$

Рівняння 3.16 дає змогу легко розрахувати необхідну ємність акумуляторної батареї АЕУ за постійного навантаження. Найважчим режимом експлуатації акумуляторних батарей АСЕ є холодні пори року, тому під час розрахунків за (3.16) приймають $\Delta t_{\text{нв}} = 16\,\text{год}$, а ступінь розрядності акумуляторної батареї як $S_{\text{р}} = 70\%$ [19].

Акумуляторна система в АЕУ набирається з окремих серійно вироблених акумуляторних батарей шляхом послідовного і паралельного їх з'єднання. Послідовне з'єднання окремих АКБ використовується для збільшення напруги, а ємність гілки акумуляторної батареї при цьому відповідає ємності окремої акумуляторної батареї. Отримана при паралельному з'єднанні АКБ має таку саму напругу, що й поодинока (однолінійна)АКБ, а ємність такої акумуляторної батареї дорівнює сумі ємностей поодиноких АКБ, що входять до неї [19].

Енергоємність АКБ для АЕУ обчислюється як:

$$W = C_{\text{н}} W_{\text{н}} \tag{3.17}$$

де W – загальна енергоємність.

Число послідовно ввімкнених одиночних АКБ у гілці:

$$l = \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{аб}}} \tag{3.18}$$

де $U_{\text{аб}}$ – напруга окремої АКБ.

Число паралельних гілок в акумуляторній батареї АЕУ:

$$m = \frac{C_{\text{н}}}{C_{\text{аб}}} \tag{3.19}$$

де $C_{\text{аб}}$ – ємність окремої АКБ.

Тоді загальне число окремих АКБ в акумуляторній системі АЕУ відповідає:

$$N = l \cdot m \tag{3.20}$$

Підставивши в (3.20) рівняння (3.16)-(3.19), одержуємо співвідношення для визначення загальної кількості поодиноких АКБ, що входять до акумуляторної системи АСЕ у вигляді:

$$N = \frac{100}{S_p} \cdot \frac{P_{\text{н}}}{W_{\text{аб}}} \cdot \Delta t_{\text{нв}} \tag{3.21}$$

де $W_{\text{аб}} = C_{\text{аб}} U_{\text{аб}}$ – енергоємність окремої АКБ.

Чим більша енергоємність або ємність за заданої напруги акумулятора, тим менше окремих акумуляторів знадобиться в акумуляторній системі. Вибравши акумулятор заданої ємності з рівнянь (3.16) і (3.19), можна скласти вираз для визначення напруги акумуляторної батареї АЕУ у вигляді:

$$U_{\text{н}} = \frac{100}{S_p} \cdot \frac{P_{\text{н}}}{mC_{\text{аб}}} \cdot \Delta t_{\text{нв}} \tag{3.22}$$

У загальному випадку навантаження АЕУ непостійне, тобто змінюється в часі. Зміну навантаження згідно з табл. 2 на інтервалі нічного часу доби можна апроксимувати графіком 3.4. Для спрощення графіка навантаження представлено двома значеннями $P_{\text{н1}}$та $P_{\text{н2}}$ доп'яти інтервалів часу. Об'єднуючи представлені на графіку 3.6 інтервали часу з однаковими значеннями навантажень, отримуємо двоступеневий графік зміни навантаження. Інтервали часу Δt_1 і Δt_2, визначені як сума інтервалів часу з навантаженням$P_{\text{н1}}$та $P_{\text{н2}}$.

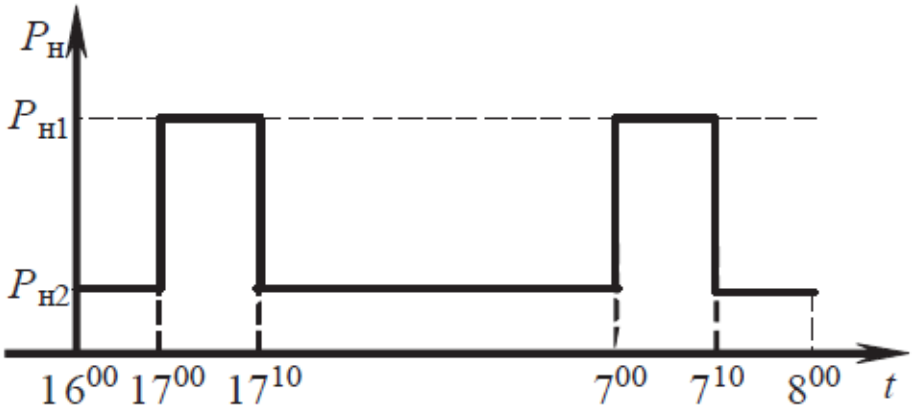


Рисунок 3.4 – Графік зміни навантаження за часом

Графік зміни ємності акумуляторної батареї автономної електроустановки за двоступеневого навантаження подано на графіку3.6.

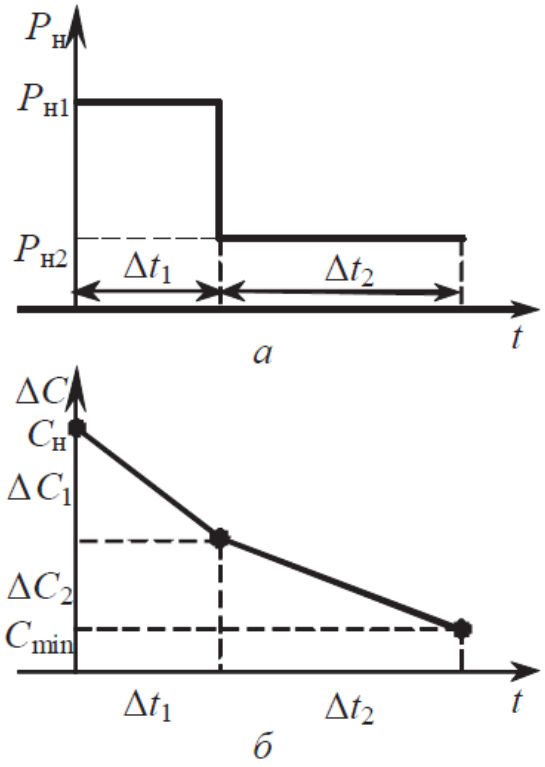


Рисунок 3.6 – Графік зміни навантаження (а) та ємності АКБ (б)

На інтервалах часу витрата ємності акумуляторної батареї визначається як:

$$\Delta C_i = \frac{P_{нi}}{U_н}\Delta t_i \qquad (3.23)$$

Враховуючи, що $\Delta C = \Delta C_1 + \Delta C_2$, з (3.15) і (3.23) отримуємо вираз для визначення необхідної ємності АКБ автономної електроустановки у вигляді:

$$C_{\text{н}} = \frac{100}{S_p U_{\text{н}}} (P_{\text{н1}} \Delta t_1 + P_{\text{н2}} \Delta t_2) \qquad (3.24)$$

Зрозуміло, що розрахунок за рівнянням (3.24) дає завищену необхідну ємність акумуляторної батареї. Для точнішого визначення необхідної ємності необхідно якомога точніше врахувати зміну графіка навантаження на інтервалі нічного часу доби [19].

3.5 Висновки з розділу 3

Найбільш ефективним способом підвищення енергоефективності автономних електроустановок є збільшення потужностей сонячних панелей. Використання сучасних фотомодулів, як-от панелі з технологією PERC або Multi Busbar, дає змогу підвищити ККД до 50% завдяки поліпшеному поглинанню сонячної енергії.

Потужності вітрогенератора значно збільшуються за більшого розміру лопатей завдяки нелінійному зростанню продуктивності, що пов'язано з підвищеною здатністю захоплення вітрової енергії та ефективнішою генерацією за навіть середніх швидкостей вітру. Введення в автономну електроустановку вторинного вітрогенератора зі збільшеними лопатями дає змогу швидше відновлювати енергетичний баланс в акумуляторних системах, забезпечуючи стабілізацію і підтримку денних піків споживання енергії. Це особливо важливо в умовах змінного навантаження та мінливих кліматичних умов, що робить систему надійнішою та гнучкішою.

Акумуляторна система є ключовим елементом у забезпеченні стабільної подачі електроенергії споживачеві, особливо в нічний час, коли фотовольтаїчні системи не генерують енергію. Для підтримки надійної роботи автономних електроустановок важливо суворо дотримуватися експлуатаційних норм

акумуляторів і контролювати рівень їхнього заряду, уникаючи глибокого розряду та перевантажень. Регулярне підтримання ємності акумуляторів на встановлених рівнях у різних режимах роботи значно підвищує енергоефективність системи, запобігаючи швидкому вичерпанню енергетичних запасів і забезпечуючи надійне енергопостачання в умовах змінного споживання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Автономні електричні системи вже сьогодні отримують значну роль у сучасній енергетиці. забезпечуючи незалежне енергопостачання в умовах відсутності доступу до централізованих електричних мереж або в разі необхідності підвищення надійності та стійкості електропостачання.

З урахуванням сучасних тенденцій, фото- та вітроенергетика має величезний потенціал для задоволення електричних потреб в електроенергії та може стати ключовим елементом у переході до постійного застосування автономних систем. Іноземний досвід показує, що впровадження розподільчих та автономних систем може стати ефективним рішенням знизити пошкоджену енергосистему України.

При детальному аналізі розглянуті недоліки автономних електроустановок середньої потужності, що використовують ВДЕ, до яких відносять: низький ККД(сучасні генераційні системи по окремості дають лише в межах 20%), залежність від енергоємності акумуляторної системи, недостатня маневреність до графіків навантаження споживачами, залежність від погодних умов.

У якості збільшення енергоефективності АЕУ, запропоновано підвищити потужність генераційних систем – підвищити енергоефективність до 50% від фотомодулів та вище 30% від вітрогенераторів (з урахуванням швидкості вітру)

Розрахунок ємності акумуляторної системи надає можливість установити певний автоматичний режим роботи, що адаптується під графік споживання, завдяки чому збільшити строк експлуатації батарей.

Введення комплексного рішення до АЕУ може стати новим поглядом на впровадження автономних систем.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Solar Philippines begins working on 4 GW solar park. Інтернет-стаття.Режим доступу: https://www.pv-magazine.com/2024/01/02/solar-philippines-begins-working-on-4-gw-solar-park/ (дата звернення: 04.05.2024)
2. U.S. Energy Information Administration. Режим доступу: https://www.eia.gov/electricity/monthly/ (дата звернення: 04.05.2024)
3. Рибак О.В. Теоретичні відомості щодо перспектив геотермальної енергетики в Україні.III Всеукраїнська науково-практична конференція за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України». Запоріжжя. ІННІ. ЗНУ. 2023.с 35. Режим доступу: https://www.znu.edu.ua/ii_znu/nauka/conf6/zbirnyk_23.pdf(дата звернення: 04.05.2024)
4. Рибак О.В. Управління режимами споживання та ефективністю використання електричної енергії. I Міжнародна науково-практична конференція «Інженерні інновації та розбудова національної економіки». Запоріжжя. ІННІ. ЗНУ. 2023.
5. Гончаренко О., Денисюк, Б., Т. Онищук. Відновлення зруйнованої інфраструктури на основі використання оцифрованих даних. Київ. KEI. 2023. Режим доступу:http://mtp.knuba.edu.ua/article/view/284891/279025(дата звернення: 04.05.2024)
6. Российские удары по украинской энергосистеме. Википедия. Режим доступу: https://ru.wikipedia.org/wiki/Российские_удары_по_украинской_энергосистеме (дата звернення: 04.05.2024)
7. Трипільська ТЕС. Інтернет-стаття. Вікіпедія: Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Трипільська_ТЕС(дата звернення: 04.05.2024)

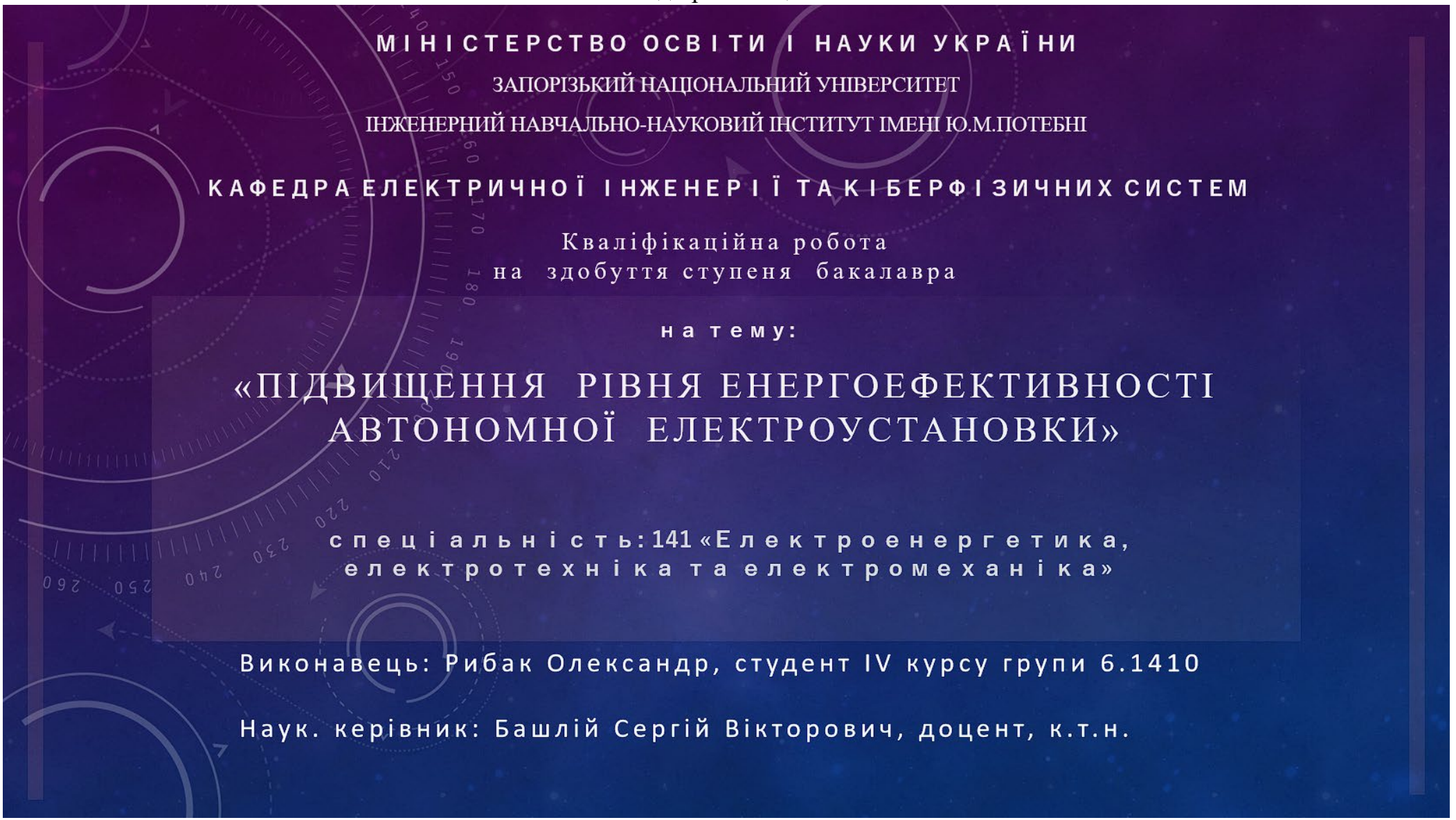
8. Підвищення тарифів на електрику. Інтернет-стаття. Режим доступу: https://forbes.ua/news/uryad-pidnyav-tarif-na-elektriku-dlya-naselennya-z-1-chervnya-na-60-31052024-21502(дата звернення: 04.05.2024)
9. Оцінка енергії сонячного випромінювання. Інтернет-стаття. Режим доступу: https://eco-electrics.com.ua/articles/otsinka-energiyi-soniachnogo-viprominiuvannia (дата звернення: 19.05.2024)
10. Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from. Інтернет-стаття. Режим доступу: https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector(дата звернення: 19.05.2024)
11. Сазонов О. В., Верьовкін Л. Л. Дослідження та розробка стабілізованого інвертора напруги для фотоелектричних систем: кваліфікаційна робота магістра спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»: Запоріжжя. ЗНУ. 2023. Режим доступу:https://dspace.znu.edu.ua/jspui/handle/12345/17402 (дата звернення: 19.05.2024)
12. Беспалько А.О. Модифікований метод класифікації графіків електричних навантажень. 2022 р. Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstreams/3a292628-d89e-431f-a748-4f76ba346524/download(дата звернення: 19.05.2024)
13. ДСТУ 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. Нац. Стандарт України. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106226(дата звернення: 19.05.2024)
14. ДСТУ 50001:2020. Системи енергетичного менеджменту. Нац. Стандарт України. Вимоги та настанова щодо використання (50001:2018) Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=90178 (дата звернення: 19.05.2024)
15. Лукутин Б.В., Муравьев Д.И. перспективы децентрализованных систем электроснабжения постоянного тока с распределённой солнечной генерацией. Известия ТПУ. 2020. №6. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/342542711_PERSPEKTIVY_DECENTRALIZOVANNYH_SISTEM_ELEKTROSNABZENIA_POSTOANNOGO_TO

KA_S_RASPREDELENNOJ_SOLNECNOJ_GENERACIEJ(дата звернення: 19.05.2024).

16. Методичні вказівки з вивчення дисципліни «Поновлювальні та альтернативні джерела енергії» та контрольні завдання для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» всіх форм навчання Укл.: О.В. Немикіна. Запоріжжя, ЗНТУ. 2019. 15 с. Режим доступу: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/4980/1/M07132.pdf (дата звернення: 19.05.2024)
17. Квитко А. В. Розрахунок потужності і вибір основних функціональних вузлів вітроелектричної установки. Науковий журнал КубГАУ, №98. Краснодар. 2014. с 1-2. Режим доступу: http://ej.kubagro.ru/2014/04/pdf/25.pdf (дата звернення: 20.05.2024)
18. Дільний І.В. Підвищення ефективності автономної вітроустановки. Тернопіль. ТНТУ ім. Івана Пулюя. Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41627(дата звернення: 20.05.2024)
19. Охоткин Григорий Петрович Методика расчета мощности солнечных электростанций. Вестник ЧГУ. 2013. №3. Режим доступу: https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-rascheta-moschnosti-solnechnyh-elektrostantsiy(дата звернення: 20.05.2024)

Додаток А

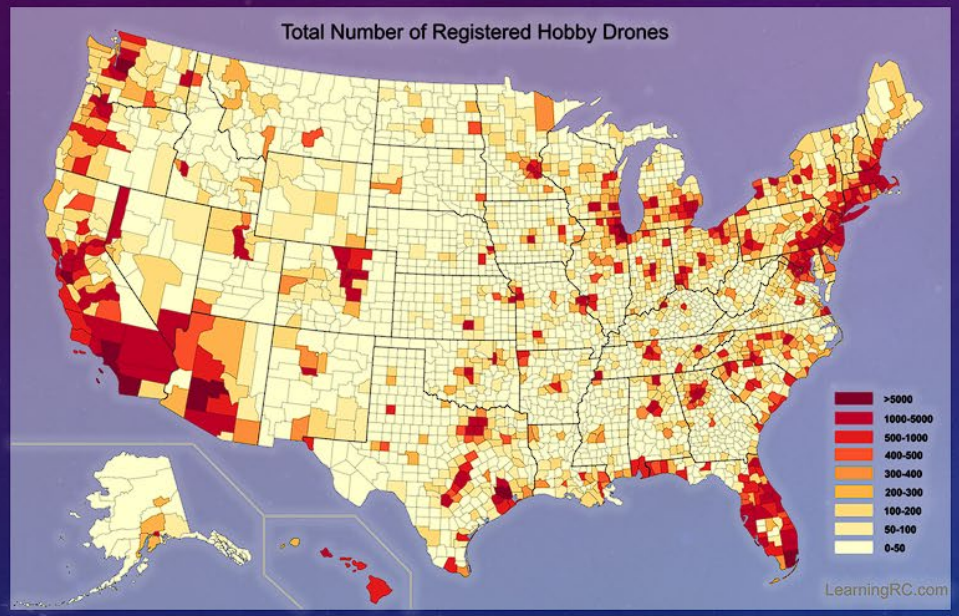
Слайд презентації № 1



Продовження додатку А (Слайд презентації № 2)

Слайд презентації № 2

Досвід автономної та розподільчої генерації в розвинених країнах



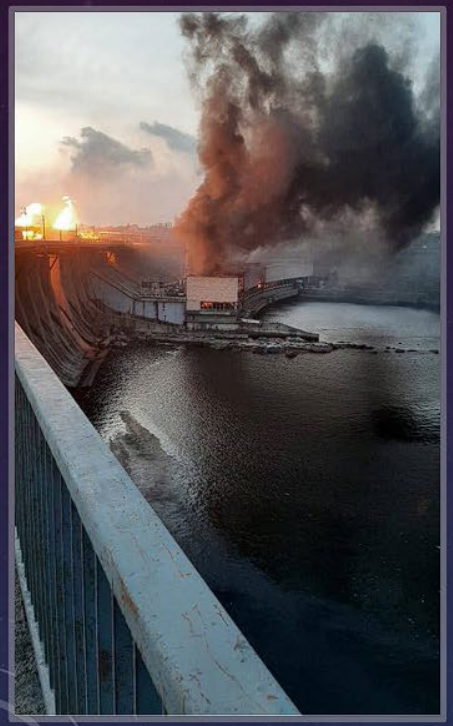
Поширеність ВДЕ у сполучених штатах

У країнах ЄС розподілена генерація виробляє в середньому близько 10% від загального обсягу виробництва електроенергії, найвищий показник - у Данії 50%. У штатах Каліфорнії та Нью-Йорку впровадження розподілених джерел енергії також супроводжується розвитком інтелектуальних мереж і систем управління, що дає змогу краще інтегрувати і використовувати потенціал ВДЕ.

Ще 2021 року було запущено батарею Tesla Megapack поруч із містом Джелонг у межах австралійського штату Вікторія. На об'єкті буде достатньо енергії для забезпечення функціонування 500 тис. будинків протягом години.

Продовження додатку А (Слайд презентації № 3)

Знищення енергетичної інфраструктури



Вся українська енергосистема, внаслідок масових атак, втратила свій енергетичний потенціал на 50%. За весь час після повномасштабної інтервенції РФ, енергетичний сектор України зазнав прямих збитків і непрямих фінансових втрат на суму 56,2 млрд, тоді як потреби у відновленні, які передбачають повну реконструкцію зруйнованих об'єктів, уже становлять 50,5 млрд.

Великих збитків зазнали ТЕС: «Укренерго» повідомляє, що у виробництві електроенергії від них в Україні впала з приблизно 30 до 5%. За даними Міненерго України, у країні знищено понад 8 ГВт генерувальних потужностей, що становить близько 40% від наявних у системі.



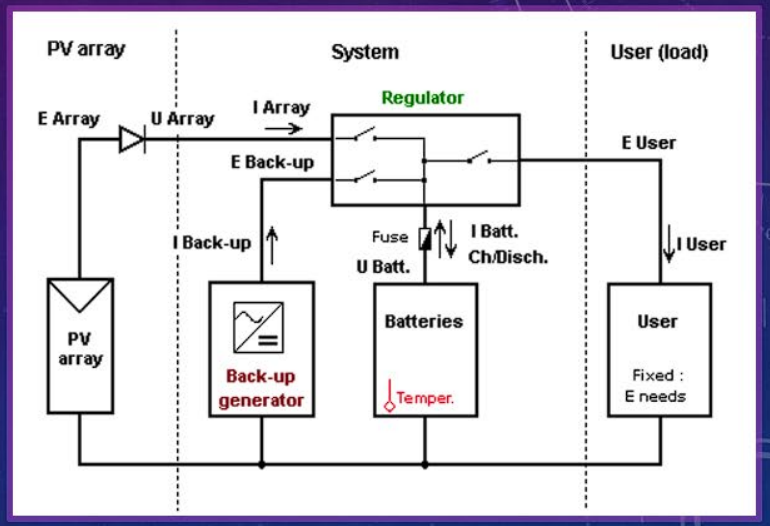


Продовження додатку А (Слайд презентації № 4)

Перспективи автономних систем в енергетичній структурі України

Поставлене завдання в роботі насамперед ставить питання про впровадження або модернізацію автономних електричних систем, які безпосередньо пов'язані з будівництвом енергетичних структур на основі відновлюваних джерел енергії.

У науково-технічних публікаціях від українських авторів, які стосуються тем щодо застосування ВДЕ, розподілене виробництво одразу стоїть наступним кроком до реалізації, оскільки відновлювальні джерела дають змогу отримати вигоду з локального вироблення електроенергії: це може бути або зниження використання електричних ресурсів з державних енерголіній, або віддача електроенергії в мережу.



Принципова схема автономних електричних систем

Продовження додатку А (Слайд презентації № 5)

Структурна схема автономної електроустановки середньої потужності (10-100 кВт)



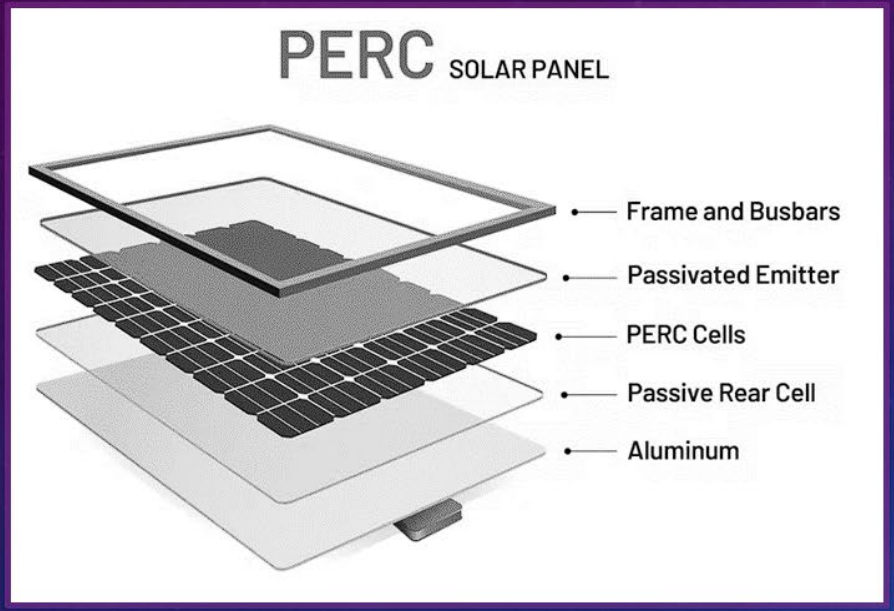
Автономна електроустановка (АЕУ) – комплекс взаємопов'язаних машин, апаратів, ліній і допоміжного устаткування разом із будівлями і приміщеннями, у яких вони встановлені, призначених для виробництва, трансформації, передавання, розподілу електричної енергії та перетворення її в інший вид енергії. Вони відокремлені від зовнішніх мереж, але можуть бути модифіковані до адаптивних установок.

Головними недоліками АЕУ є:

- низький ККД генераторів;
- залежність генерації від погодних умов;
- залежність від стану зарядки АКС;
- чутливість до різких змін споживання.

Продовження додатку А (Слайд презентації № 6)

Підвищення енергоефективності АЕУ за рахунок ФВС



будова фотомодуля із PERC технологією

PERC-фотомодулі мають більшу поглинаючу здатність, завдяки чому посилюється генерація електроенергії.

Типи фотоелементів за КПД та поширеністю

Тип фотоелемента	КПД (%)	Поширеність
Монокристалічні (Mono-Si)	15-22%	Широке застосування у сонячних установках.
Полікристалічні (Poly-Si)	13-18%	Масове виробництво сонячних панелей.
Тонкоплівкові (InTeCd)	10-16%	Використовуються у малопотужних і гнучких рішеннях.
Кадмій-телуридні (CdTe)	9-12%	Обмежене застосування у малопотужних пристроях.
Мідно-індій-диселенідні (CIS/CIGS)	7-12%	Використовуються у великих сонячних установках.
Аморфні кремнієві (a-Si)	6-9%	Застосовуються у складних і дорогих системах.

Продовження додатку А (Слайд презентації № 7)

Підвищення енергоефективності АЕУ за рахунок ВГ

$$E_{кін} = \frac{m \cdot V^2}{2}$$

де $E_{кін}$ = кінетична енергія вітру;
$m = \rho \cdot V \cdot S$; ρ – щільність повітря, 1,226 кг/м3;
V – швидкість руху повітряних мас

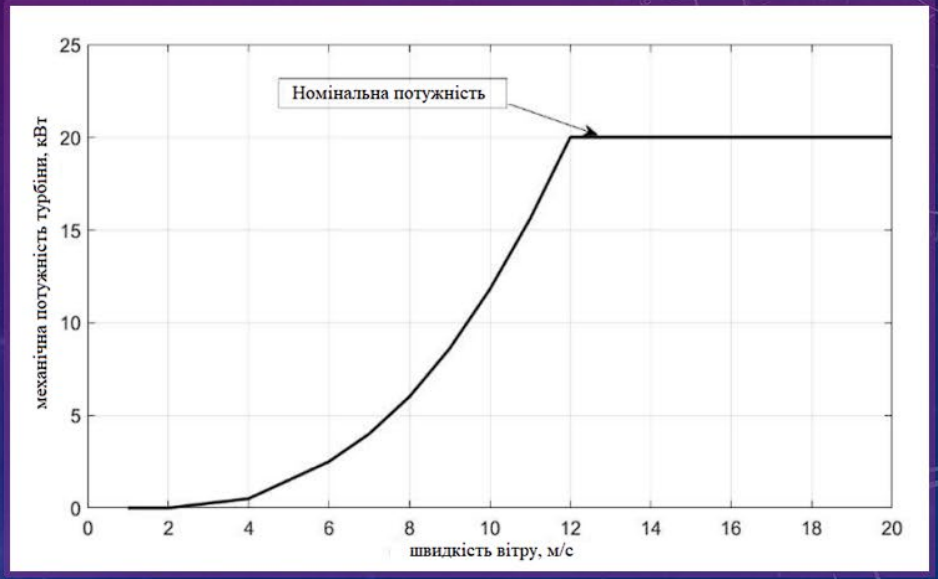
$$N_{вк} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \xi \cdot D^2 \cdot V^3$$

де ξ = 0,4 … 0,45 – коефіцієнт використання енергії від повітряного потоку;
D – діаметр вітроколеса;

.

$$M = \frac{P_m}{v_w}$$

де **M –** обертовий момент, що діє на вал;
Pm – потужність;
vm – швидкість повітрняних мас до перерізу.



Щоб швидше вийти на потужності ближче до номінальної, краще встановлювати в АЕУ вітрогенератор з більшим радіусом лопатей, це зрозуміло по формулі вихідної потужності, де значення діаметру лопаті D має квадратичну степінь

Продовження додатку А (Слайд презентації № 8)

Алгоритм розрахунку ємності АКБ згідно прогнозу споживання

Для ефективного функціонування акумуляторні системи в АЕУ часто включають засоби моніторингу та контролю, що забезпечують оптимальне управління зарядкою і розрядкою, що сприяє підтримці більшої енергоефективності та довговічності системи.

Ємність акумулятора відіграє головну роль у накопичені збереженого заряду для автономної електроустановки. Вона показує, яку кількість електричного заряду можна акумулювати за заданої номінальної напруги та як довго батарея зможе живити певне навантаження без підзарядки.

Завдяки введення ступені розрядженості, зарядку АКС можна підтримувати на певному рівні, тим самим збільшити строк експлуатації та енергозберігаючу здібність акумуляторів.

$$S_{\text{р}} = \frac{C_{\text{н}} - C_{\min}}{C_{\text{н}}} \cdot 100\% = \frac{\Delta C}{C_{\text{н}}} \cdot 100\%$$

$S_{\text{р}}$ - ступінь розрядженості акумуляторної батареї.

$$\Delta C = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \Delta t = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \left(24 - \Delta t_{\text{дв}}\right)$$

де ΔC – витрата ємності;
Δt – час живлення навантаження, год;
$P_{\text{н}}$ – номінальна потужність навантаження;
$U_{\text{н}}$ – номінальна напруга навантаження;

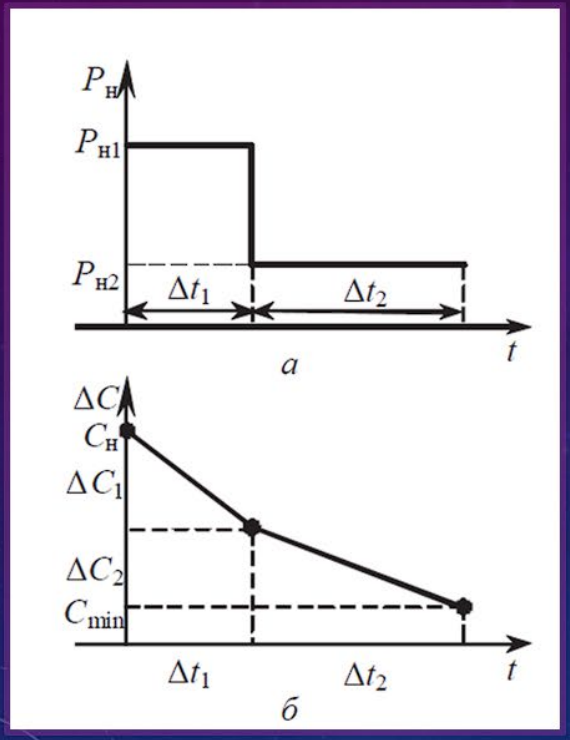
$$C = \frac{100}{S_{\text{р}}} \cdot \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \cdot \Delta t$$

$$U_{\text{н}} = \frac{100}{S_p} \cdot \frac{P_{\text{н}}}{mC_{\text{аб}}} \cdot \Delta t_{\text{нв}}$$

де $C_{\text{аб}}$ – ємність окремої АКБ;
m - число паралельних гілок в акумуляторній батареї АЕУ.

Продовження додатку А (Слайд презентації № 9)

Алгоритм розрахунку ємності АКБ згідно прогнозу споживання (продовження)



Графік зміни навантаження (а) та ємності АКБ (б)

Зміну навантаження згідно на інтервалі нічного часу доби можна спростувати графіком. Для спрощення графіка навантаження представлено двома значеннями $P_{н1}$ та $P_{н2}$ до п'яти інтервалів часу.

Об'єднуючи представлені на графіку інтервали часу з однаковими значеннями навантажень, отримуємо двоступеневий графік зміни навантаження. Інтервали часу $\Delta t1$ і $\Delta t2$, визначені як сума інтервалів часу з навантаженням $P_{н1}$ та $P_{н2}$.

Визначення необхідної ємності АКБ автономної електроустановки у вигляді:

$$C_н = \frac{100}{S_p U_н}(P_{н1}\Delta t_1 + P_{н2}\Delta t_2)$$

Для більш точнішого визначення необхідної ємності необхідно якомога точніше врахувати зміну графіка навантаження на інтервалі нічного часу доби.

Продовження додатку А (Слайд презентації № 10)

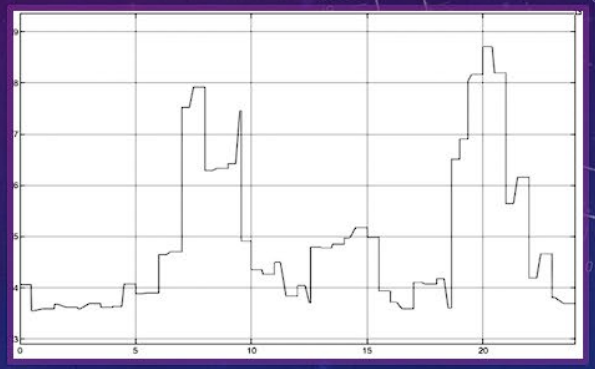
Прогнозування добового навантаження на прикладах побутового та промислового споживачів

Споживач для АЕУ розглядається у вигляді графіку навантаження.

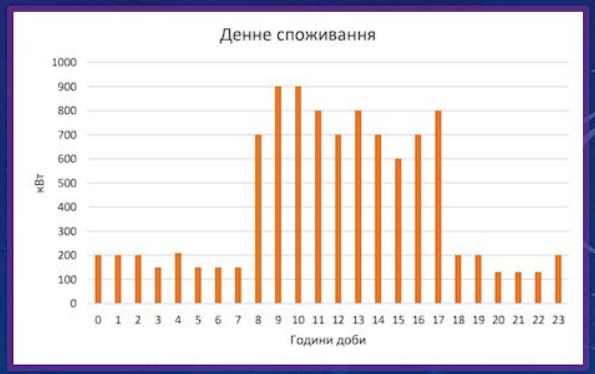
Графіки навантаження споживачів (графіки споживання) можуть змінюватись в залежності від різних умов (погоді умови, аварійні випадки, КЗ та інші), до яких можна адаптувати акумуляторні системи програмним забезпеченням.

В залежності від типу споживача (побутовий, комерційний, промисловий), вводяться відповідні до графіку режими, знаходження піків та спадів навантажень, що числено перевищують сталий рівень споживання, що дає змогу задіяти вже комплексну генерацію для прямої віддачі електроенергії споживачеві.

1)



2)



Приклад графіку 1) побутового споживача;
2) підприємства

Продовження додатку А (Слайд презентації № 11)

Висновки

1. **Автономні електричні системи** вже сьогодні отримують значну роль у сучасній енергетиці. забезпечуючи незалежне енергопостачання в умовах відсутності доступу до централізованих електричних мереж або в разі необхідності підвищення надійності та стійкості електропостачання.
2. **З урахуванням сучасних тенденцій**, фото- та вітроенергетика має величезний потенціал для задоволення електричних потреб в електроенергії та може стати ключовим елементом у переході до постійного застосування автономних систем. Іноземний досвід показує, що впровадження розподільчих та автономних систем може стати ефективним рішенням знизити пошкоджену енергосистему України.
3. **При детальному аналізі розглянуті** недоліки автономних електроустановок середньої потужності, що використовують ВДЕ, до яких відносять: низький ККД(генераційні системи по окремості дають дише 20%), залежність від енергоємності акумуляторної системи, недостатня маневреність до графіків навантаження споживачами, залежність від погодних умов.
4. **У якості збільшення енергоефективності АЕУ**, запропоновано підвищити потужність генераційних систем - підвищити енергоефективність до 50% від фотомодулів та вище 30% від вітрогенераторів (з урахуванням швидкості вітру)
5. **Розрахунок ємності акумуляторної системи** надає можливість установити певний автоматичний режим роботи, що адаптується під графік споживання, завдяки чому збільшити строк експлуатації батарей.
6. **Введення комплексного рішення** до АЕУ може стати новим поглядом на впровадження автономних систем.