

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В. П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« 02 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Ониськів Віктору Степановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз ефективності гібридних систем електропостачання для побутових споживачів

Керівник роботи Бабюк Сергій Миколайович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 31 » грудня 2025 року № 4/7-1164

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи метеорологічні та геофізичні параметри регіону; характеристика існуючої системи електропостачання будинку; склад і технічні характеристики обладнання; енергетичні та фінансово економічні показники проекту.

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

1. Аналітичний розділ

2. Розрахунковий розділ

3. Проектно-конструкторський розділ

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

Загальні висновки

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

Комплексне дослідження та обґрунтування параметрів гібридної системи електропостачання для приватного житлового будинку в умовах м. Тернополя. Актуальність об'єкту та предмету дослідження. Аналіз потенціалу ВДЕ. Обґрунтування структури та параметрів системи. Енергетичний баланс та техніко-економічні показники. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Безпека життєдіяльності, основи хорони праці | К.т.н., доцент Гурик О. Я. | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання 02 січня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|--------------------------------|----------|
| 1 | Вступ | 15.01.2026 | |
| 2 | Аналітичний розділ | 15.02.2026 | |
| 3 | Розрахунковий розділ | 01.04.2026 | |
| 4 | Проектно-конструкторський розділ | 15.05.2026 | |
| 5 | Безпека життєдіяльності та основи охорони праці | 01.06.2026 | |
| 6 | Висновки | 10.06.2026 | |
| 7 | Оформлення пояснювальної записки | 15.06.2026 | |
| 8 | Оформлення графічної частини | 15.06.2026 | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Студент

_____ (підпис)

Ониськів В.С.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Бабюк С. М.

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41. - Т. : ТНТУ, 2026.

Стор. 62; рис. 15; табл. 8; креслень (презентацій) 7; джерел 20.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Аналіз ефективності гібридних систем електропостачання для побутових споживачів».

Метою роботи є розробка та обґрунтування технічних рішень щодо підвищення ефективності функціонування гібридних систем електропостачання побутових об'єктів шляхом оптимізації алгоритмів керування енергопотоками та вибору оптимальних параметрів накопичувачів енергії.

Актуальність теми: в умовах зростання енергоспоживання, нестабільності централізованих електромереж та необхідності забезпечення енергетичної незалежності особливого значення набуває використання відновлюваних джерел енергії. Для України ця проблема посилюється через пошкодження енергетичної інфраструктури та високі ризики перебоїв електропостачання.

Гібридні системи електропостачання, що поєднують сонячну, вітрову генерацію, накопичувачі енергії та резервні генератори, є перспективним рішенням для забезпечення стабільності, надійності та економічної ефективності електропостачання.

Ключові слова: ГІБРИДНА СИСТЕМА, ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ВІТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 6 |
| 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ..... | 8 |
| 1.1 Розвиток ВДЕ на міжнародній платформі енергозбереження | 9 |
| 1.2 Висновки до розділу 1 | 14 |
| 2 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ | 16 |
| 2.1 Методологія вибору та техніко-економічне обґрунтування вітроенергетичного обладнання | 17 |
| 2.2 Техніко-економічне обґрунтування та вибір дизельної електростанції..... | 21 |
| 2.3 Обґрунтування вибору та розрахунок генерації фотоелектричної системи | 24 |
| 2.4 Визначення річної економічної ефективності системи..... | 28 |
| 2.5 Визначення та аналіз економічної ефективності | 30 |
| 2.6 Висновки до розділу 2..... | 31 |
| 3 ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ..... | 33 |
| 3.1 Обґрунтування вибору обладнання та схеми підключення | 33 |
| 3.2 Вибір гібридного інвертора..... | 33 |
| 3.3 Гібридні електростанції | 34 |
| 3.4 Автономні дизельні електростанції..... | 36 |
| 3.5 Автономні газові електростанції..... | 38 |
| 3.6 Вітроенергетичні установки | 39 |
| 3.7 Сонячні електростанції | 43 |
| 3.8 Сонячна електростанція в гібридній системі електропостачання..... | 47 |
| 3.9 Специфікація системи накопичення енергії (ESS) | 50 |

| | |
|--|----|
| 3.10 Висновок до розділу 3..... | 51 |
| 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ | 53 |
| 4.1 Дія електричного струму на організм людини, види електротравм у побутовому секторі | 53 |
| 4.2 Аналіз ризику при обслуговуванні електрообладнання..... | 56 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 58 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ..... | 60 |

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах постійного зростання світового попиту на енергоресурси, глобальної кліматичної кризи та специфічних викликів, що стоять перед енергетичною системою України, питання забезпечення надійного та сталого електропостачання побутового сектору набуває критичного значення. Пошкодження енергетичної інфраструктури, нестабільність централізованих мереж та прагнення споживачів до енергетичної автономності зумовлюють стрімкий розвиток розподіленої генерації. Гібридні системи електропостачання (ГСЕ), що поєднують відновлювані джерела енергії (ВДЕ), системи накопичення енергії та мережеве підключення, є найбільш перспективним технічним рішенням для підвищення енергоефективності та живучості приватних об'єктів. Проте оптимізація взаємодії компонентів таких систем для мінімізації втрат та забезпечення безперебійної роботи залишається відкритим науково-технічним питанням [1].

Мета роботи полягає у розробці та обґрунтуванні технічних рішень щодо підвищення ефективності функціонування гібридних систем електропостачання побутових об'єктів шляхом оптимізації алгоритмів керування енергопотоками та вибору оптимальних параметрів накопичувачів енергії.

Для досягнення мети було визначено такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан використання альтернативних джерел енергії та верифікувати вихідні показники їх надійності;
- визначити вплив зовнішніх факторів та законів розподілу випадкових величин на стабільність енергосистеми;
- здійснити вибір та порівняльний аналіз компонентів гібридної системи електропостачання;
- реалізувати системний підхід до оцінювання надійності та енергоефективності запропонованого технічного рішення.

Об'єктом дослідження є процес електропостачання приватного будинку в м. Тернопіль із залученням альтернативних джерел.

Предметом дослідження є методи оптимізації структури та режимів функціонування гібридних енергосистем на основі відновлюваних джерел енергії.

Методи дослідження базуються на використанні методів математичного моделювання, системного аналізу, а також сучасного спеціалізованого програмного забезпечення для розрахунку енергетичних балансів та візуалізації результатів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованих алгоритмів та схемних рішень при проектуванні та модернізації автономних і мережових гібридних систем для індивідуальних споживачів.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

Згідно з аналітичними звітами Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), світове споживання електричної енергії демонструє стабільну динаміку зростання: за прогнозами, до 2030 року цей показник сягне 30 трлн кВт·год, а загальна встановлена потужність генеруючих об'єктів складе близько 5900 ГВт. У структурі світової енергетики роль відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) стає визначальною – провідні країни планують забезпечити до 39% потреб саме за рахунок «зеленої» генерації. Це зумовлено вичерпністю викопних ресурсів та необхідністю мінімізації антропогенного впливу на клімат. Динаміку галузі підтверджують обсяги інвестицій: якщо у 2010 році в сектор ВДЕ було спрямовано близько 290 млрд євро, то вже у 2015 році світові капіталовкладення перевищили 329 млрд доларів США.

В Україні за останнє десятиліття також спостерігається тенденція до нарощування потужностей альтернативної енергетики. Проте через нестабільну макроекономічну ситуацію та політичні виклики країні не вдалося повною мірою реалізувати цілі Національного плану дій, що передбачав досягнення 9-відсоткової частки ВДЕ у загальному балансі. Наприклад, станом на кінець 2014 року сумарна потужність об'єктів ВДЕ становила 1300 МВт, що забезпечувало лише близько 2% від загального обсягу генерації. Ключовими напрямками розвитку вітчизняної альтернативної енергетики залишаються вітрові (ВЕС) та сонячні (СЕС) електростанції, вироблення енергії на яких у 2016 році склало 925 ГВт\год та 492 ГВт\год відповідно [2].

Одним із головних бар'єрів для розвитку галузі в Україні залишається обмежений доступ до капіталу. Для порівняння: у країнах Європейського Союзу з розвиненим сектором ВДЕ частка позикового капіталу може сягати 80% при вартості кредитування нижче 7% річних. В українських реаліях через високі регуляторні ризики фінансові установи вимагають від інвесторів значно більшої частки власного капіталу (у 2 рази більше, ніж в ЄС), а вартість валютних кредитів коливається в межах 8–10% річних.

Попри фінансові труднощі, технічний потенціал України є одним із найвищих у Південно-Східній Європі. За даними міжнародного агентства IRENA, він оцінюється у 408,2 ГВт (без урахування великої гідроенергетики). Найбільші перспективи мають:

- вітроенергетика – технічний потенціал до 321 ГВт;
- сонячна енергетика – потенціал до 71 ГВт.

До 2030 року економічно обґрунтований потенціал впровадження ВДЕ може досягти 16–22 ГВт. Особливо перспективним є сектор теплоенергетики, де відновлювані джерела здатні суттєво замінити традиційне паливо. Очікується, що використання біомаси та інших джерел ВДЕ дозволить виробляти до 57 млн Гкал теплової енергії щороку, що еквівалентно економії приблизно 7 млрд м³ природного газу [3].

Додатковим стимулом для інтеграції гібридних систем є прогнозоване зниження вартості технологій: очікується, що витрати на будівництво СЕС впадуть на 57%, а ВЕС – на 13%. За умови стабілізації законодавчого поля та покращення інвестиційного клімату, Україна має всі можливості для модернізації енергетичного сектору та зміцнення енергонезалежності через широке впровадження технологій відновлюваної енергетики.

1.1 Розвиток ВДЕ на міжнародній платформі енергозбереження

Світовий ринок інвестицій у сектор відновлюваної енергетики демонструє стрімке прискорення та виходить на нові історичні максимуми. Протягом останніх років середньорічний темп приросту капіталовкладень (CAGR) у глобальний енергоперехід значно перевищив показники минулих десятиліть і становить понад 10–12%. Якщо у 2017 році рекордним вважався обсяг у 350 млрд доларів, то за підсумками 2025 року загальні світові інвестиції в енергетичний перехід (включаючи ВДЕ, електротранспорт та мережі) сягнули безпрецедентних 2,3 трильйона доларів. Безпосередньо у сектор генерації відновлюваної енергії було спрямовано близько 690 млрд доларів, що майже

вдвічі перевищує історичний максимум 2017 року, попри високу волатильність сировинних та фінансових ринків.

Європейський досвід останніх років остаточно закріпив перехід до нової енергетичної парадигми на тлі енергетичної кризи. Тільки за один рік європейські країни вводять понад 70–80 ГВт нових відновлюваних потужностей, де домінуючу роль відіграють сонячна енергетика (рекордні понад 60 ГВт за рік) та вітрогенерація. Станом на кінець 2024 – початок 2025 року частка відновлюваних джерел у загальній структурі генерації електроенергії в Європейському Союзі досягла рекордних 47,4%, випередивши всі викопні види палива разом узжиті. Крім того, у структурі нових генеруючих об'єктів відновлювані джерела складають понад 90–92% від усіх нововведених потужностей, що свідчить про повне стратегічне витіснення традиційної вугільної та газової генерації та впевнений рух до кліматичних цілей 2030 року (частка ВДЕ 42,5%–45% у загальному енергобалансі).

На противагу цьому, матеріально-технічна база енергетики України характеризується критичним рівнем зносу. За висновками Інституту відновлюваної енергетики НАН України, значна частина атомних енергоблоків вичерпує свій проектний ресурс; понад 70% із них потребуватимуть продовження терміну експлуатації протягом наступного десятиліття. Ситуація в електромережевому господарстві також є складною: 42,2% ЛЕП напругою 220-330 кВ працюють понад 40 років, а понад 64% обладнання трансформаторних підстанцій фізично застаріло. Аналогічні проблеми спостерігаються у розподільчих мережах, де близько 40% ліній та трансформаторів потребують негайної реконструкції [4].

Дані НКРЕКП підтверджують, що 84% блоків ТЕС та ТЕЦ перевищили межу фізичного зносу (рисунки 1.1) [6].

Технологічний прогрес призвів до появи інноваційних продуктів у сфері ВДЕ, які дозволяють знижувати питомі витрати ресурсів. Завдяки значному потенціалу сонячної та вітрової енергії, ВДЕ стають конкурентоспроможними порівняно з дорогою та екологічно небезпечною традиційною генерацією.

Попри це, сектор ВДЕ в Україні демонструє розвиток із середньорічним темпом росту потужностей на рівні 12,5% (рисунок 1.1).

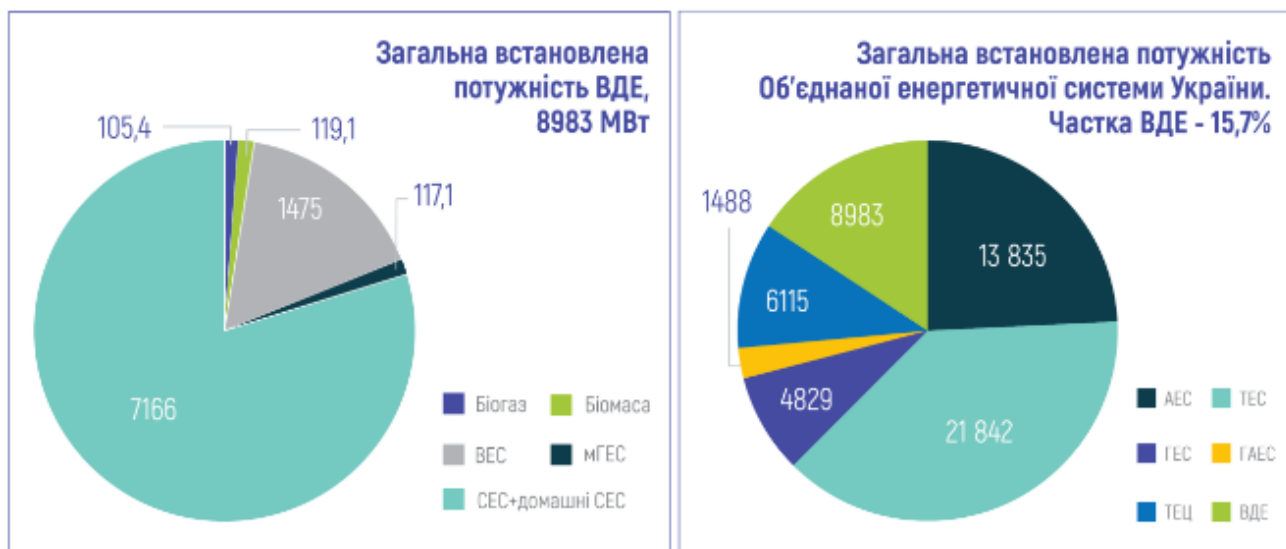


Рисунок 1.1 – Стан ВДЕ в Україні

Таблиця 1.1 – Розвиток інноваційних технологій в секторі ВДЕ

| Джерело енергії | Витрати на генерацію |
|---|----------------------|
| Природний газ | 625-950 |
| Віддалений дизельний генератор | 3000-5000 |
| Вітер | 600-1500 |
| Біомаса | 1000-1500 |
| Фотоелектричний без підключення до мережі | 2000-4500 |
| Фотоелектричний з підключенням до мережі | 4000-6500 |

Прогнозується, що до 2030 року світові витрати на ВДЕ сягнуть 7 трлн доларів. Це шлях до формування надійних взаємозв'язків між державою, бізнесом та суспільством через підвищення енергетичної ефективності.

Головним недоліком автономних систем на основі одного джерела є їхня залежність від мінливих кліматичних умов (сезонність, добові коливання

швидкості вітру та інсоляції). Вирішенням цієї проблеми є створення гібридних відновлюваних енергетичних систем (ГВЕС), що поєднують два або більше джерел енергії. ГВЕС забезпечують вищу надійність та стабільність енергопостачання, трансформуючи первинну енергію в електричну або акумулюючи її в різних формах (хімічній, тепловій, механічній).

Координація роботи джерел у ГВЕС потребує методів багатокритеріальної оптимізації для мінімізації витрат та викидів. Сучасні системи проектуються як мікромережі (microgrids) із підтримкою технології «Plug & Play», що дозволяє додавати нові пристрої без повної реконфігурації системи. Оцінка ефективності таких систем проводиться на основі критеріїв надійності та вартості життєвого циклу (LCC).

До складу ГВЕС можуть також входити теплові джерела (біогазові установки, сонячні колектори) та резервні дизель-генератори [6]. На рисунках 1.2-1.5 зображено типові структурні схеми гібридних станцій.

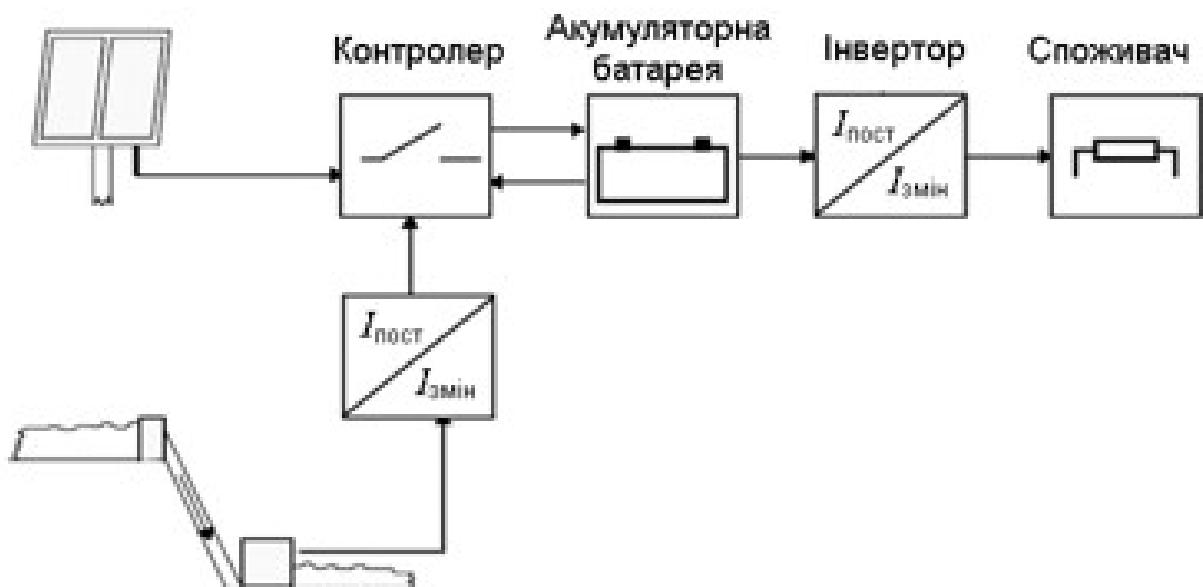


Рисунок 1.2– Структурна схема типової гібридної енергетичної системи з використанням сонячної та гідро енергій

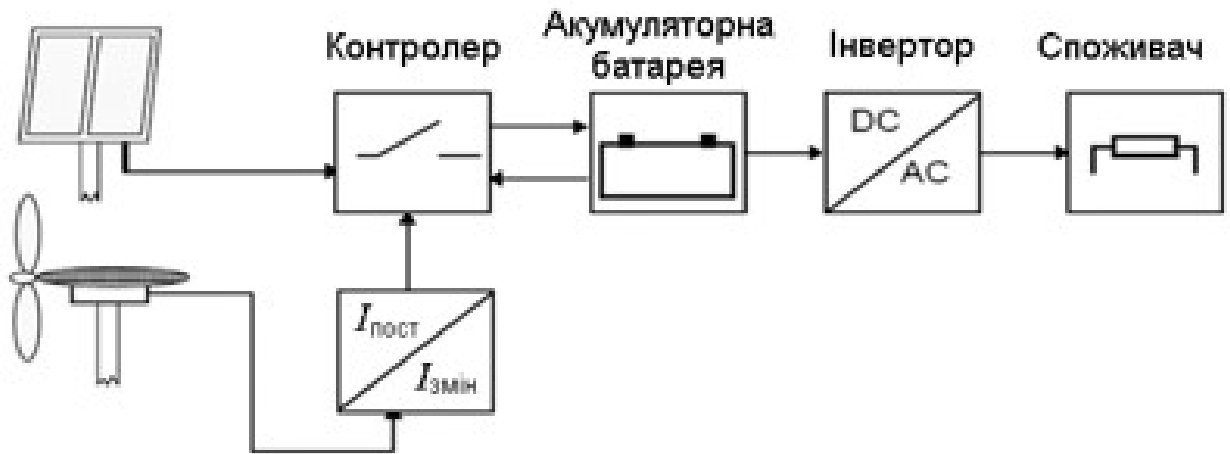


Рисунок 1.3 – Структурна схема типової гібридної енергетичної системи на основі використання джерел сонячної енергії та енергії вітру

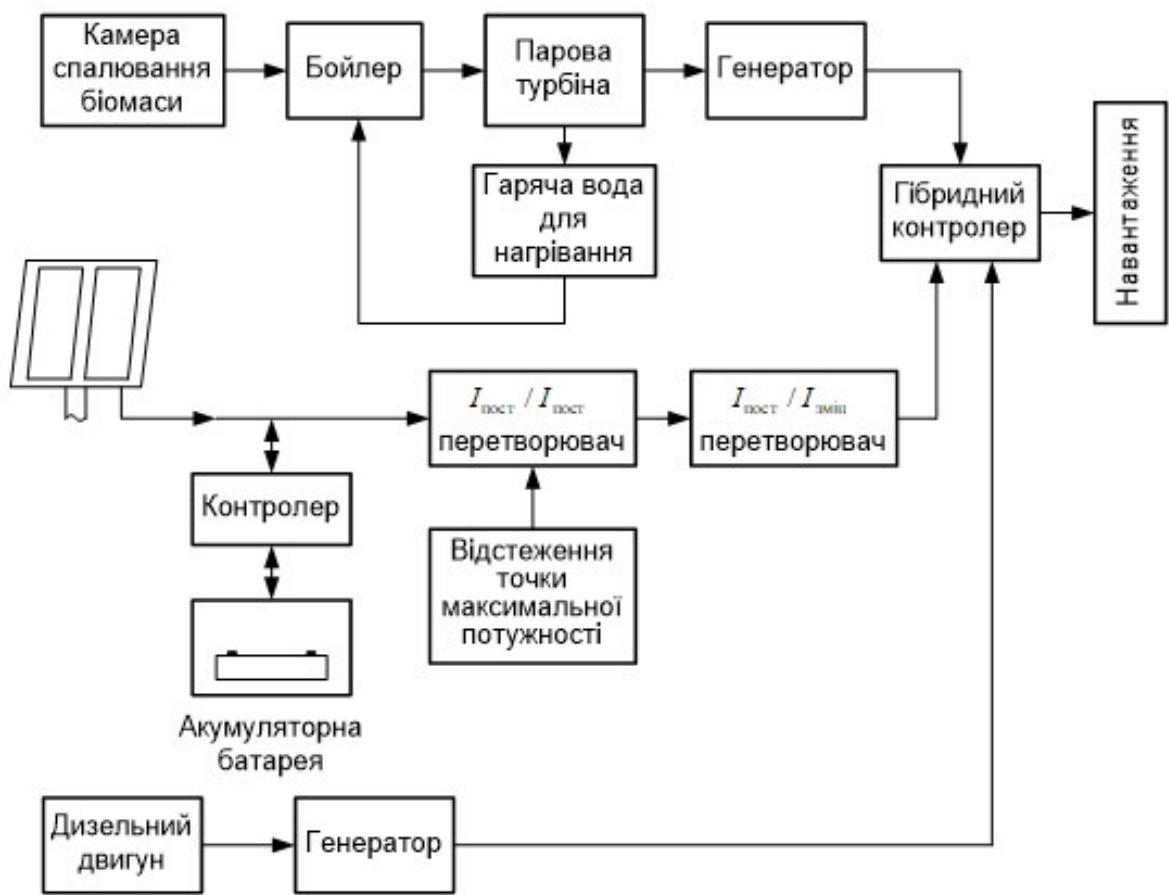


Рисунок 1.4 – Структурна схема типової гібридної енергетичної системи на основі використання енергії біопалива, сонячної енергії та дизель-генератора.

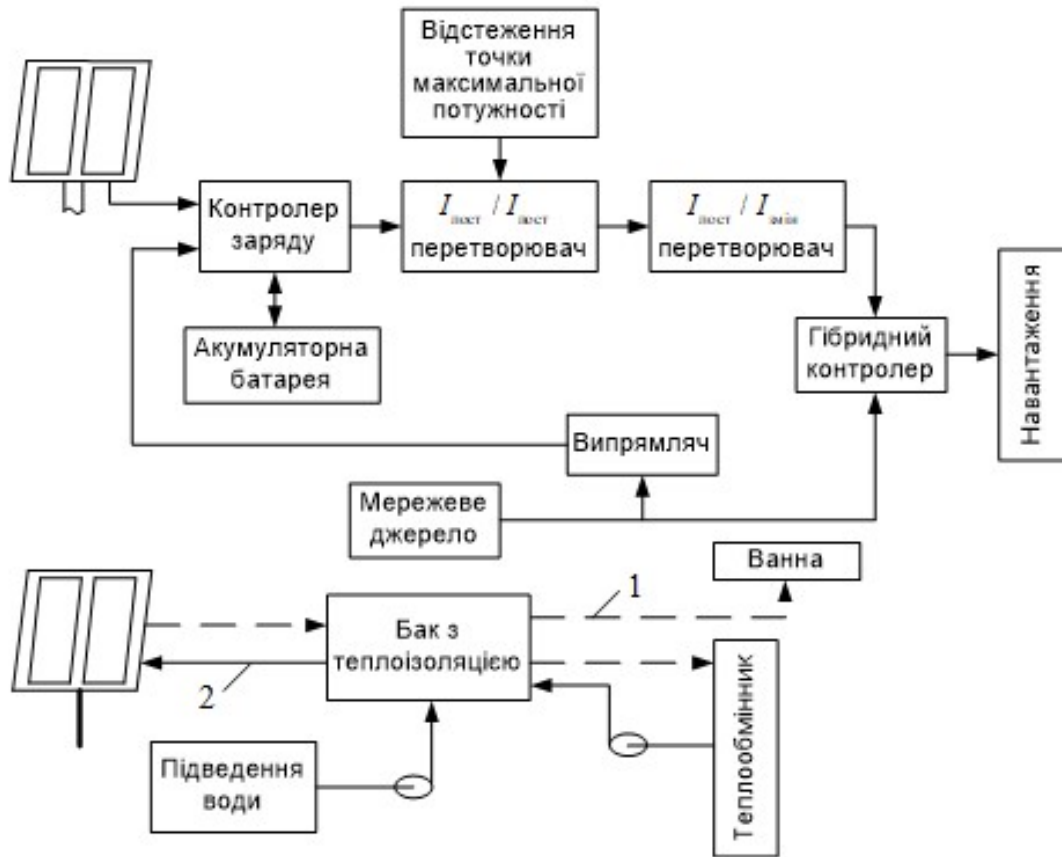


Рисунок 1.5 – Структурна схема типової гібридної енергетичної системи

1.2 Висновки до розділу 1

У ході виконання розділу було проведено комплексний аналіз основних компонентів, що формують технічну базу сучасних гібридних систем електропостачання. Аналіз світового досвіду свідчить про незворотну зміну глобальної енергетичної парадигми, що зумовлено вичерпністю викопного палива та екологічними викликами. За прогнозами МЕА, до 2030 року світове споживання електроенергії сягне 30 трлн кВт·год, при цьому частка «зеленої» генерації має покрити до 39% потреб. Стрімке прискорення інвестиційного процесу підтверджується досягненням історичного максимуму у 2025 році, коли загальні капіталовкладення в енергетичний перехід склали рекордні 2,3 трлн доларів (зокрема, 690 млрд доларів безпосередньо у сектор відновлюваної генерації). Провідником цих змін є Європейський Союз, де частка ВДЕ у

структурі генерації на межі 2024–2025 років досягла безпрецедентних 47,4%, випередивши всі викопні види палива разом ужиті.

На противагу світовим тенденціям модернізації, матеріально-технічна база традиційної енергетики України перебуває у критичному стані. Понад 84% енергоблоків ТЕС та ТЕЦ повністю перевищили межу фізичного зносу, значна частина атомних енергоблоків вичерпує свій проєктний ресурс, а понад 40% магістральних ЛЕП (220–330 кВ) та трансформаторного обладнання підстанцій працюють понад 40 років і потребують негайної реконструкції. Незважаючи на сталий розвиток ВДЕ із середньорічним темпом росту потужностей на рівні 12,5%, через макроекономічні бар'єри, обмежений доступ до капіталу (висока вартість кредитування у 8–10% річних та подвійні вимоги до частки власного капіталу порівняно з ЄС) та політичні виклики, країні не вдалося своєчасно реалізувати первинні цілі Національного плану дій.

Головним стримуючим фактором широкого впровадження автономних систем на базі одного відновлюваного джерела є їхня критична залежність від стохастичних кліматичних умов (добові та сезонні коливання інсоляції та швидкості вітру). Технічно та економічно раціональним розв'язанням цієї проблеми є перехід до проєктування гібридних відновлюваних енергетичних систем (ГВЕС), які об'єднують кілька типів генерації (сонячну, вітрову, біомасу) та модульні системи накопичення енергії (мікромережі/microgrids). Завдяки технології «Plug & Play» та сучасним методам багатокритеріальної оптимізації за критеріями надійності та вартості життєвого циклу (LCC), саме ГВЕС здатні забезпечити гарантовану безперебійність енергопостачання, мінімізувати питомі витрати на генерацію та стати основою для підвищення енергетичної незалежності кінцевих об'єктів.

2 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

Проектування та впровадження гібридної системи електропостачання на сьогодні є одним із найбільш прогресивних та ефективних рішень для формування повністю автономного та енергетично незалежного середовища приватного домоволодіння. Така система дозволяє не лише забезпечити безперебійне живлення критично важливих вузлів будівлі, а й оптимізувати споживання ресурсів залежно від поточної генерації та тарифної політики.

Для проведення практичних розрахунків та моделювання робочих процесів у якості об'єкта дослідження обрано приватний будинок, розташований у місті Києві. Об'єкт має загальну площу 350 м², що передбачає значну кількість енергоємних споживачів та потребує стабільного розподілу потужностей протягом доби. Географічне розташування об'єкта (Київський регіон) визначає вхідні параметри інсоляції та вітрового потенціалу, які будуть використані в подальших обчисленнях.

Загальний вигляд та архітектурне планування об'єкта представлено на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд об'єкта дослідження (приватний будинок площею 350 м²)

Вибір такої площі та локації дозволяє розглянути систему не як суто побутову, а як складний енергетичний вузол, де доцільно застосовувати комбінацію сонячної генерації, акумуляторного резерву та, за необхідності, паливного генератора для покриття пікових навантажень або тривалих періодів низької генерації ВДЕ.

2.1 Методологія вибору та техніко-економічне обґрунтування вітроенергетичного обладнання

Процес інтеграції вітроенергетичної установки (ВЕУ) у структуру гібридної системи електропостачання приватного будинку площею 350 м² вимагає ретельного аналізу як вхідних метеорологічних даних, так і специфічних характеристик обладнання. Вибір потужності та типу вітрогенератора є багатокритеріальним завданням, де необхідно враховувати загальну встановлену потужність системи, яка для великих об'єктів може сягати промислових масштабів (у контексті локальних мереж – до 3,45 МВт у пікових значеннях для всього енерговузла).

Враховуючи площу ділянки, відведеної під будівництво та експлуатацію ВЕУ, а також необхідність мінімізації логістичних витрат, доцільним є використання вітрогенераторів одиничною потужністю від 2 до 5 МВт для великих проектів, або масштабованих малих установок для приватного сектору. Використання однієї потужної одиниці (наприклад, класу 3,45 МВт) часто є більш виправданим у складних логістичних умовах, оскільки сумарна маса та габарити одного агрегату полегшують доставку та монтаж порівняно з групою менш потужних турбін, що потребують розгалуженої інфраструктури підключення.

При виборі конкретного типу вітрогенератора критично важливими є наступні фактори:

1. Профіль швидкості вітру: аналіз середньорічних та пікових значень у точці встановлення.

2. Розрахункова споживана потужність об'єкта: з урахуванням добових та сезонних графіків навантаження будинку площею 350 м².
3. Геометричні параметри: діаметр ротора та висота вежі, що визначають площу обтікання та стабільність потоку.

Місце встановлення агрегату відіграє вирішальну роль у забезпеченні паспортного ККД турбін. Будь-які перешкоди (будівлі, дерева) та особливості рельєфу місцевості створюють зони турбулентності у вітровому потоці. Це не лише знижує ефективність генерації, а й спричиняє нерівномірні механічні навантаження на лопаті, що призводить до прискореного зносу підшипників та редуктора [7].

Необхідно критично ставитися до показників потужності, що заявляються виробниками. Досить часто дані базуються на випробуваннях в ідеалізованих умовах аеродинамічних труб, де повітряний потік є абсолютно ламінарним та рівномірним. У реальних умовах експлуатації відхилення від заявлених параметрів може становити від 10% до 30%. Тому розрахунок реальної потужності за уточненими формулами є обов'язковим етапом проектування.

Конструктивні особливості та вартісна структура ВЕУ. Сучасний вітрогенератор складається з трьох ключових технологічних вузлів, кожен з яких має свою частку у загальній вартості системи:

1. Роторна система (близько 20% вартості): Включає лопаті, виготовлені з композитних матеріалів, та ступицю. Основна функція – перетворення кінетичної енергії вітру в механічну енергію обертання з низькою частотою.
2. Генераторний блок та трансмісія (близько 34% вартості): Містить електричний генератор, систему керуючої електроніки та, як правило, планетарний редуктор. Редуктор необхідний для перетворення низькошвидкісного обертання ротора у високошвидкісне обертання вала генератора, придатне для стабільного виробництва електроенергії. У сучасних моделях також використовуються приводи з регульованою частотою або системи безступінчастої передачі.

3. Опорна конструкція та системи орієнтації (близько 15% вартості): Включає вежу, механізм повороту гондоли (якор) та систему приводу ротора за вітром.

Для прикладу, вітрогенератор потужністю 1,5 МВт має висоту вежі близько 80 метрів. Роторний вузол у зборі важить приблизно 22 000 кг, а гондола з генератором – понад 52 000 кг. Фундамент такої установки потребує близько 190 кубічних метрів бетону та 26 тонн армуючої сталі, що підкреслює складність інженерної підготовки майданчика.

Експлуатаційний ресурс та стратегії обслуговування. Стандартний термін експлуатації вітряних турбін розрахований на 20 років. Проте через складні кліматичні умови, динамічні вібровідсотки та корозійний вплив середовища, установки рідко досягають цього терміну без капітального ремонту. Сучасна тенденція розвитку галузі спрямована на перехід від планового технічного обслуговування до профілактичного (прогнозного) моніторингу.

Це реалізується через впровадження систем інтелектуального відстеження стану конструкцій. Для моніторингу використовуються акселерометри (контроль вібрацій редуктора) та тензорезистори (вимірювання деформацій гондоли). Для аналізу динаміки лопатей у реальному часі застосовують цифрову кореляцію зображень та стереофотограмметрію, що дозволяє виявляти мікротріщини та дефекти на ранніх стадіях, мінімізуючи час простою та фінансові втрати [8].

Математичне моделювання та прогнозування генерації. Ефективне управління енергосистемою неможливе без точних прогнозів. Оскільки енергія вітру має імпульсивний характер через нестабільність потоків, баланс системи підтримується шляхом постійного регулювання.

1. Короткострокові прогнози (1–72 години): необхідні для оперативного планування поставок та торгівлі на ринку електроенергії.
2. Середньострокові прогнози (3–7 днів): використовуються для планування графіків технічного обслуговування та зупинок генераторів.

Математична модель потужності вітроустановки базується на наступних фундаментальних рівняннях:

Потужність ВЕУ ($P_{ВЕУ}$) з урахуванням ККД передачі ($\eta = 0,8 \dots 0,9$):

$$P_{ВЕУ} = P_T \cdot \eta$$

Потужність турбіни (P_T) визначається через коефіцієнт використання енергії вітру (ξ):

$$P_T = P_{\Pi} \cdot \xi$$

Важливо розуміти, що ξ (коефіцієнт Беца) теоретично не може перевищувати 0,593, оскільки швидкість вітру після турбіни не може дорівнювати нулю. Реальний показник успішних конструкцій становить 0,4–0,55.

Потужність потоку повітря (P_{Π}):

$$P_{\Pi} = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2}$$

де V – швидкість вітру (м/с), ρ – щільність повітря (1,225 1,29 кг/м³), S – площа ометання ротора (м²).

Середньомісячна генерація (W_M) розраховується як:

$$W_M = P_{CP} \cdot 30 \cdot 24$$

Розподіл швидкостей вітру у часі підпорядковується статистичному закону Гаусса (або Вейбулла):

$$V_{розп} = A \cdot e^{V-V_0}$$

де V_0 – середня швидкість, A – параметр форми.

Практичний приклад розрахунку для локальних умов для об'єкта, розташованого в умовах із середньою швидкістю вітру 4,5 м/с та ротором радіусом 4 м, проведемо розрахунок потенційної потужності.

При $\xi = 0,5$, $\eta_{ред} = 0,8$ та $\eta_{ген} = 0,9$:

$$P = 0,5 \cdot \pi \cdot 4^2 \cdot 0,5 \cdot 4,5^3 \cdot 1,29 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 425,22 \text{ Вт}$$

Незважаючи на те, що потенційна потужність потоку на такій площі становить близько 1,2 кВт, реальна вихідна потужність через втрати на завихрення, внутрішній опір та ККД агрегатів буде значно нижчою. Це

підтверджує, що швидкість вітру є критичним фактором, оскільки її зростання вдвічі збільшує вихідну енергію у вісім разів. Таким чином, вибір високої щогли є ключовим інвестиційним рішенням при побудові системи.

2.2 Техніко-економічне обґрунтування та вибір дизельної електростанції

У структурі гібридних енергосистем приватних будинків дизельні електростанції (ДЕС) виконують критичну роль гарантованого джерела живлення. В умовах нестабільної генерації з відновлюваних джерел (вітроустановок та сонячних панелей) саме рідкопаливний генератор забезпечує енергетичну безпеку об'єкта. Окрім функції резервування, залежно від конфігурації вітро-сонячно-дизельного комплексу, цей агрегат може виконувати буферні функції, ефективно демпфуючи (компенсуючи) різкі пульсації потужності, що виникають через мінливість погодних умов.

Для забезпечення безперебійного енергопостачання споживачів у будь-яких експлуатаційних ситуаціях, вибір кількості та потужності агрегатів базується на наступних нормативних вимогах:

1. Запас потужності: Сумарна встановлена потужність агрегатів повинна перевищувати добовий максимум навантаження щонайменше на 25%. Математично це виражається умовою:

$$P_{ДЕС} \geq 1,25 \cdot P_{max}$$

2. Оптимізація навантаження: Для запобігання передчасному зносу двигуна та перевитраті палива, завантаження генератора має знаходитися в діапазоні від 25% до 80% від його номінальної потужності.
3. Принцип надмірності: Кількість агрегатів має бути достатньою для можливості виведення одного з них з експлуатації для проведення регламентного сервісного обслуговування, поточного або капітального ремонту без припинення живлення об'єкта.

4. Кліматична адаптація: Виконання та системи захисту ДЕС повинні відповідати температурним та вологісним характеристикам місцевості (в даному випадку – Тернопільського регіону).

Враховуючи зазначені вимоги та розрахований енергобаланс будинку площею 350 м², для інтеграції в систему обрано однофазний дизельний генератор торгової марки NIK типу DG 7500 номінальною потужністю 6,0 кВт.

Модель NIK DG 7500 розроблена спеціально для резервного живлення житлових будівель. Агрегат вирізняється низькою чутливістю до якості дизельного палива та демонструє високу стабільність роботи за критичних навантажень. Конструкція камери згоряння двигуна оптимізована для максимальної ефективності паливоповітряної суміші, що забезпечує значну економію пального та подовжує міжремонтний інтервал робочих частин. Такий підхід також дозволяє знизити токсичність вихлопних газів.

Генераторні установки зазвичай класифікуються за кількома ознаками: типом вихідного струму (змінний одно- або трифазний, постійний), вихідною напругою та частотою (50 Гц для України). Важливим критерієм є тип системи охолодження. Електростанції з повітряним охолодженням, до яких відноситься обрана модель, є компактними та мобільними, проте мають обмеження за часом безперервної роботи (до 10–12 годин), після чого потребують технологічної паузи для охолодження. Натомість стаціонарні агрегати з рідинним охолодженням здатні працювати цілодобово, але мають значно більші габарити.

Серцем установки є чотиритактний двигун внутрішнього згоряння, де запалювання палива відбувається шляхом стиснення повітря до високих температур. Чотиритактний цикл (впуск, стиснення, робочий хід, випуск) є більш економічним та екологічним порівняно з двотактними аналогами. Дизельні агрегати працюють на нижчих обертах порівняно з бензиновими, що зумовлено специфікою згоряння палива, але це забезпечує їм значно вищий ресурс (моторесурс) та зносостійкість.

Таблиця 2.1 – Технічні та експлуатаційні характеристики NIK DG 7500

| Параметр | Значення |
|---------------------------------|----------------------|
| Максимальна вихідна потужність | 6,5 кВт |
| Номінальна потужність | 6,0 кВт |
| Система запуску | Автозапуск (ATS) |
| Тип генератора | Синхронний, щітковий |
| Тип охолодження двигуна | Примусове повітряне |
| Тривалість безперервної роботи | до 12 годин |
| Питома витрата палива | 280 г/кВт·год |
| Об'єм паливного бака | 15 л |
| Рівень акустичного тиску (шуму) | 68 дБ |
| Вага (суха) | 180 кг |

Розрахунок необхідної потужності для побутових потреб. При виборі потужності генератора необхідно враховувати пускові струми приладів, які містять електродвигуни. Коефіцієнт пускового струму ($k_{\text{пуск}}$) може суттєво збільшувати миттєву споживану потужність у момент ввімкнення.

Розглянемо типовий сценарій одночасної роботи приладів у будинку:

1. Пилосос: При номінальній потужності $P_{\text{ном}} = 1500\text{Вт}$ та $k_{\text{пуск}} = 1,5$:

$$P_{\text{пуск}} = 1500 \cdot 1,5 = 2250 \text{ Вт}$$

2. Холодильник: При $P_{\text{ном}} = 150\text{Вт}$ через високий пусковий момент компресора ($k_{\text{пуск}} \approx 3$):

$$P_{\text{пуск}} = 150 \cdot 3 = 450 \text{ Вт}$$

3. Освітлення: Кілька LED-ламп загальною потужністю 200 Вт (пусковий коефіцієнт не враховується). Сумарна миттєва потужність складає:

$$P_{\text{сумарна}} = 2250 + 450 + 200 = 2900 \text{ Вт}$$

З урахуванням необхідного експлуатаційного запасу (20%):

$$P_{\text{необхідна}} = 2900 \cdot 1,2 = 3480 \text{ Вт (3,48 кВт)}$$

Однак, якщо в системі задіяний свердловинний насос потужністю 1 кВт ($k_{\text{пуск}} = 3$), його запуск вимагатиме додатково 3000 Вт, що призведе до перевантаження малопотужного генератора. Саме тому обрана модель на 6 кВт є оптимальною для забезпечення комфортного проживання.

З точки зору економіки, дизельний генератор потужністю 5,5–6 кВт споживає в середньому 2,1 літра пального на годину при інтенсивному навантаженні. При безперервній роботі протягом доби споживання складе 50,4 літрів. За ринкової вартості дизельного палива на рівні 89 грн/л (актуалізована ціна на 2026 рік), витрати за повний місяць безперервної автономної роботи можуть сягнути 134 568 грн. Це ще раз підтверджує доцільність використання ДЕС саме як резервного компонента в гібридній системі, де основне навантаження мають нести сонячні та вітрові установки.

2.3 Обґрунтування вибору та розрахунок генерації фотоелектричної системи

Для компенсації денного навантаження та підвищення автономності приватного будинку розглянемо встановлення мережевої сонячної електростанції (СЕС) встановленою потужністю 20 кВт. Основу системи складають фотоелектричні модулі (ФЕМ), що перетворюють сонячну інсоляцію на постійний струм, та інверторне обладнання для перетворення його на змінний струм синусоїдальної форми.

Для проектування обрано полікристалічні фотомодулі Amerisolar AS-6P30-275W. Незважаючи на активний розвиток монокристалічних технологій, дана

модель залишається еталонною для розрахунків завдяки стабільним температурним коефіцієнтам та високій питомій генерації в умовах розсіяного випромінювання, характерного для осінньо-зимового періоду в Україні [8].

Основні технічні параметри проекрованої СЕС систематизовано в таблиці 2.2.

Розрахунок енергетичної ефективності виконано на основі даних середньомісячної інсоляції для даної широти. У таблиці 2.3 наведено орієнтовні показники середньодобової генерації системи в розрізі сезонів.

Таблиця 2.2 – Основні технічні параметри проекрованої СЕС

| Параметр системи | Значення |
|---------------------------|---------------------------------------|
| Номінальна потужність СЕС | 20 кВт |
| Тип фотомодуля | Amerisolar AS-6P30-275W (полікристал) |
| Мережевий інвертор | HUAWEI SUN2000-20KTL (3 фази) |
| Загальна кількість ФЕМ | 73 шт. (з округленням масиву) |
| Корисна площа масиву ФЕМ | ~129,2 м ² |
| Габарити одного модуля | 1640 × 992 × 35 мм |
| ККД фотомодуля | 16,9% |

Таблиця 2.3 – Показники середньодобової генерації проектованої СЕС

| Сезон | Зима | Весна | Літо | Осінь |
|---------------------------------|-------|-------|--------|-------|
| Виробіток ($W_{\text{доба}}$) | 28,42 | 75,03 | 114,32 | 58,52 |

Аналіз погодинної інсоляції та компенсації навантаження. Для оцінки ефективності заміщення споживання з мережі проведено погодинний розрахунок у найбільш критичний – зимовий період. Дані базуються на моделі сонячної активності при повному світловому дні (грудень-лютий). Дані зведено у таблицю 2.4.

Таблиця 2.4 – Розрахунок балансу енергоспоживання у зимовий період

| Час доби | Навантаження (P_n), кВт | Генерація СЕС, кВт | Споживання з мережі, кВт |
|------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 08:00 | 13,0 | 2,51 | 10,49 |
| 10:00 | 9,0 | 4,39 | 4,61 |
| 12:00 | 7,5 | 4,39 | 3,11 |
| 14:00 | 8,0 | 2,09 | 5,91 |
| Разом за добу | 219,0 | 28,42 | 190,58 |

Економічний розрахунок та капітальні інвестування. Розрахуємо загальний енергетичний баланс за сезон (90 днів) без урахування СЕС ($W_{БК}$) та з її впровадженням (W_k). Використовуємо уточнену формулу енергоспоживання:

$$W = P_{сер} \cdot T \cdot n$$

де $P_{сер}$ – середньодобове споживання/генерація, $T = 30$ днів, $n = 3$ місяці.

1. Базове споживання (без СЕС):

$$219 \cdot 30 \cdot 3 = 19,71 \text{ тис. кВт}\cdot\text{год.}$$

2. Зимової генерація СЕС:

$$28,424 \cdot 30 \cdot 3 = 2,56 \text{ тис. кВт}\cdot\text{год.}$$

3. Залишкове споживання (Зима):

$$19,71 - 2,56 = 17,15 \text{ тис. кВт}\cdot\text{год.}$$

Таблиця 2.5 – Зведений енергетичний баланс об'єкта (потужність 20 кВт)

| Сезон | Споживання без СЕС, тис. кВт·год | Генерація СЕС, тис. кВт·год | Баланс після компенсації |
|-------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Зима | 19,8 | 2,6 | 17,2 |
| Весна | 19,8 | 6,7 | 13,1 |
| Літо | 19,8 | 10,2 | 9,6 |
| Осінь | 19,8 | 5,2 | 14,6 |

Оцінка капітальних вкладень ($K_{пр}$). Сукупна вартість проекту включає витрати на обладнання ($K_{об}$), логістику ($Z_{тзс}$) та монтажні-налагоджувальні роботи ($Z_{мн}$):

$$K_{пр} = K_{об} + Z_{тзс} + Z_{мн}$$

За актуальними даними компаній-постачальників («АксіомПлюс» та ін.), вартість комплексу обладнання на 20 кВт (інвертор, панелі, кріплення, кабель) становить 448 075 грн.

Розрахунок витрат на монтаж ($Z_{\text{мн}}$) при залученні бригади з 2 осіб на 120 робочих годин із врахуванням коефіцієнтів доплат ($K_{\text{д}}$) та соціального внеску ($K_{\text{см}}$):

$$Z_{\text{мн}} = (2 \cdot 40 \cdot 120) \cdot 1,1 \cdot 1,2 \cdot 1,1 = 13\,939 \text{ грн.}$$

Таким чином, повний обсяг капітальних інвестицій ($K_{\text{пл}}$) становить:

$$K_{\text{пр}} = 448\,075 + 13\,940 = 462\,015 \text{ грн.}$$

Висновок: Інтеграція фотоелектричної станції потужністю 20 кВт у комбінації з вітрогенератором та дизельним резервом є найбільш доцільним технічним рішенням для автономізації великих приватних об'єктів. Це дозволяє скоротити річні витрати на електроенергію на 35–45% та забезпечити енергонезалежність у періоди дефіциту потужності в загальній мережі.

2.4 Визначення річної економічної ефективності системи

Економічна доцільність впровадження гібридної вітро-сонячної установки з дизельним резервом оцінюється шляхом розрахунку річної економії. Вона формується з двох складових: прямої економії за рахунок зниження споживання з мережі та прибутку від реалізації надлишків генерації за «зеленим тарифом», за вирахуванням витрат на паливо для ДЕС [9].

Розрахунок річної економії ($E_{\text{рік}}$) проводиться за формулою:

$$E_{\text{рік}} = W_{\text{СПрік}} \cdot C_{\text{Емер}} + W_{\text{над}} \cdot C_{\text{ЗТ}} - V_{\text{дп}} \cdot C_{\text{дп}}$$

де – $W_{\text{СПрік}}$ – обсяг електроенергії, заміщений власною генерацією, кВт·год; $C_{\text{Емер}}$ – діючий тариф на електроенергію для населення (станом на 2026 рік приймаємо середньозважений тариф 4,32 грн/кВт·год); $W_{\text{над}}$ – обсяг надлишків енергії, що експортується в мережу, кВт·год; $C_{\text{ЗТ}}$ – ставка «зеленого тарифу» (згідно з постановами НКРЕКП для приватних СЕС, введених в

експлуатацію в попередні періоди, складає близько 5,38 грн/кВт·год без ПДВ);
 $V_{\text{дп}}$ – об'єм спожитого дизельного палива за рік, л; $\text{Ц}_{\text{дп}}$ – вартість дизельного палива (приймаємо 89 грн/л).

Розрахунок витрат на дизельне паливо. Об'єм споживання палива дизель-генератором ($V_{\text{дп}}$) залежить від обсягу виробленої ним енергії ($W_{\text{дг}}$) та питомої витрати палива на 1 кВт·год:

$$V_{\text{дп}} = W_{\text{дг}} \cdot \Delta_{\text{дг}}$$

Враховуючи, що ДЕС вмикається лише у випадках глибокого розряду АКБ та за відсутності вітрової та сонячної генерації (переважно в нічний час взимку), річний виробіток становить $W_{\text{дг}} = 191 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. При питомій витраті $\Delta_{\text{дг}} = 0,28 \text{ л/кВт} \cdot \text{год}$:

$$V_{\text{дп}} = 191 \cdot 0,28 = 53,48 \text{ л.}$$

Витрати на паливо за рік складуть:

$$\text{Ц}_{\text{дп}} = 53 \text{ л} \cdot 89 \text{ грн/л} = 4717 \text{ грн.}$$

Підсумковий розрахунок економії. Підставляємо значення:

$$E_{\text{рік}} = (10928 \cdot 4,32) + (3998 \cdot 5,38) - (53 \cdot 89) = 47209 + 21509 - 4717 = 64001 \text{ грн.}$$

Визначення чистої річної економії. Повна річна економія ($E_{\text{повна}}$) розраховується з урахуванням щорічних витрат на обслуговування системи (С), таких як чистка фотомодулів, заміна фільтрів ДЕС та регламентні перевірки інверторного обладнання:

$$E_{\text{повна}} = E_{\text{рік}} - С$$

Приймаючи вартість сервісного обслуговування на рівні $С = 18608 \text{ грн}$ (що включає амортизаційні відрахування на заміну АКБ у майбутньому):

$$E_{\text{повна}} = 65962 - 18608 = 47354 \text{ грн.}$$

Отриманий показник чистої економії в розмірі 47 354 грн на рік дозволяє розрахувати термін окупності капітальних вкладень. Враховуючи динаміку зростання цін на енергоносії в Україні, термін повернення інвестицій для такої гібридної системи складе близько 8–10 років, що є прийнятним показником для об'єктів малої відновлюваної енергетики.

2.5 Визначення та аналіз економічної ефективності

Заключним етапом проектування є визначення терміну окупності капітальних витрат. Цей показник демонструє період часу, за який сумарна чиста економія від експлуатації гібридної системи повністю покриє інвестиційні витрати на її створення.

Розрахунок терміну окупності (T_p) проводиться за формулою:

$$T_p = \frac{K}{E_{\text{повна}}}$$

Де K – загальна сума капітальних витрат (враховуючи сонячну станцію, вітрогенератор, дизель-генератор та монтажні роботи), грн; $E_{\text{повна}}$ – чиста річна економія з урахуванням усіх експлуатаційних витрат, грн.

Таблиця 2.6 – Зведена таблиця техніко-економічних показників проекту

| № п/п | Найменування показника | Одиниці виміру | Значення |
|-------|---|----------------|----------|
| 1 | Загальні капітальні витрати (K) | грн. | 739 988 |
| 2 | Річні експлуатаційні витрати (C) | грн. | 18 608 |
| 3 | Валова річна економія ($E_{\text{рік}}$) | грн. | 73 988 |
| 4 | Чиста річна економія ($E_{\text{повна}}$) | грн. | 55 380 |
| 5 | Розрахунковий коефіцієнт ефективності (E_p) | - | 0,075 |
| 6 | Термін окупності капітальних витрат (T_p) | років | 13,4 |

На основі проведених розрахунків у розділах 2.3 та 2.4, капітальні витрати на систему потужністю 20 кВт становлять 462 015 грн (тільки за сонячний сегмент) або 739 988 грн за повний гібридний комплекс. Використовуючи значення чистої річної економії ($E_{\text{повна}} = 55\,380$ грн), отримуємо:

$$T_p = \frac{739\,988}{55\,380} \approx 13,36 \text{ років.}$$

Додатково розраховується коефіцієнт економічної ефективності (E_p), який є величиною, оберненою до терміну окупності:

$$E_p = \frac{1}{T_p} = \frac{55\,380}{739\,988} \approx 0,075$$

Результати техніко-економічного аналізу впровадження гібридної системи в умовах тернопільського регіону зведені у таблиці 2.6.

2.6 Висновки до розділу 2

На основі проведеного техніко-економічного аналізу впровадження гібридної сонячно-вітро-дизельної електростанції можна зробити наступні узагальнення:

1. Економічна ефективність інвестицій, при зіставленні розрахованого коефіцієнта ефективності (прибутковості) капітальних витрат із нормативним значенням, визначеним для прийняттого терміну окупності ($T_{\text{норм}} = 14$ років), встановлено, що показники проекту знаходяться в межах норми. Враховуючи динаміку підвищення тарифів на електроенергію в Україні та можливість реалізації надлишків за «зеленим тарифом», впровадження даного технічного заходу є економічно доцільним. Система не лише окупає себе в осяжній перспективі, а й суттєво капіталізує об'єкт нерухомості.
2. Екологічний вплив та сталий розвиток, окрім прямої фінансової вигоди, запропонована гібридна система має вагомий позитивний вплив на навколишнє середовище. Заміна частини енергії, що генерується

традиційними ТЕС на вугіллі та газі, «чистою» енергією сонця та вітру дозволяє:

- Суттєво знизити викиди вуглекислого газу (CO₂) в атмосферу.
- Зменшити теплове забруднення та викиди дрібнодисперсного пилу.
- Мінімізувати використання дизельного генератора (лише як аварійного резерву), що запобігає зайвим викидам продуктів згоряння палива.

Враховуючи сучасний курс України на «зелений енергетичний перехід» та необхідність забезпечення локальної енергонезалежності в умовах нестабільної роботи об'єднаної енергосистеми, даний проєкт є актуальним та перспективним для широкого впровадження у приватному секторі.

3 ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Обґрунтування вибору обладнання та схеми підключення

Для забезпечення надійної та ефективної роботи гібридної системи електропостачання приватного будинку площею 350 м², обрано конфігурацію обладнання, що дозволяє інтегрувати відновлювані джерела енергії (ВДЕ), системи накопичення та резервний дизельний генератор.

3.2 Вибір гібридного інвертора

Ключовим етапом проектування системи безперебійного енергопостачання є коректний вибір обладнання для перетворення та розподілу енергії. У даному проєкті роль "серця" всієї системи виконує трифазний гібридний інвертор. Він не просто перетворює постійний струм від сонячних панелей та акумуляторів у змінний, а виступає інтелектуальним центром керування енергопотоками між мережею, генерацією, накопичувачем та споживачами. Щоб забезпечити максимальну ефективність, надійність та функціональність системи у відповідності до поставлених завдань, визначено наступні ключові критерії вибору інвертора:

Ключовими критеріями вибору стали:

- Необхідна номінальна потужність 10-15 кВт, для живлення усіх електроспоживачів;
- Режим «підкачування» (Grid-Injection/Zero Export): Інвертор здатний динамічно підмішувати енергію від PV-панелей до мережі або зміщувати фази для живлення навантаження, що дозволяє максимально використовувати власну генерацію;
- Форма вихідного сигналу: Чиста синусоїда (THD < 3%), що є обов'язковим для живлення сучасного побутового обладнання, включаючи опалювальні котли та системи автоматизації;

- Час перемикання на АКБ (UPS mode): Не більше 10-20 мс, що гарантує безперебійну роботу чутливих приладів (комп'ютери, системи зв'язку) при аварійному зникненні напруги в зовнішній мережі;
- Керування генератором: Наявність «сухих контактів» (Dry Contacts) для автоматичного запуску та зупинки дизельного генератора NIK DG 7500 на основі заданих параметрів напруги АКБ.

3.3 Гібридні електростанції

Гібридна сонячна електростанція (СЕС), яка в міжнародній практиці класифікується як ESS (Energy Storage System) або резервна СЕС, є універсальним рішенням, що інтегрує переваги автономних та мережевих систем. Основними функціональними можливостями такої системи є забезпечення повної енергонезалежності об'єкта, реалізація механізму «зеленого» тарифу та автоматичне резервування живлення.

У ГВЕС пріоритет віддається споживанню власної генерації. Надлишки виробленої енергії можуть бути спрямовані на зарядку акумуляторних батарей (АКБ) або реалізовані в загальну мережу за стимулюючим тарифом. У періоди дефіциту сонячної інсоляції система автоматично перемикається на споживання з зовнішніх електричних мереж або використовує накопичений в АКБ ресурс. Враховуючи складність конфігурації, такі станції потребують індивідуального проектування та точного розрахунку потужностей під конкретні потреби домогосподарства.

Типовий склад гібридної СЕС (ESS) включає наступні компоненти:

- Фотоелектричні модулі (сонячні панелі) – пристрої для прямого перетворення сонячного випромінювання в постійний електричний струм;
- Гібридний інвертор – інтелектуальний вузол із вбудованим контролером заряду, що керує потоками енергії між джерелами та споживачами;

- Акумуляторна система (АКБ) – накопичувальний блок, характеристики та ємність якого є визначальними для загальної вартості та автономності системи;
- Система кріплень ФЕМ – конструктивні елементи для надійної фіксації панелей на даху або наземних конструкціях;
- Автоматика захисту (AC/DC) – комплекс пристроїв для забезпечення електробезпеки та захисту від перенапруг по стороні постійного та змінного струмів;
- Система моніторингу – програмно-апаратний комплекс для дистанційного контролю за генерацією та станом обладнання;
- Інтелектуальний лічильник (Smart Meter) – пристрій для обліку енергії та запобігання неконтрольованому перетоку потужності в центральну мережу (може бути як зовнішнім, так і інтегрованим в інвертор).

Структурна організація типової гібридної енергосистеми представлена на рисунку 3.1

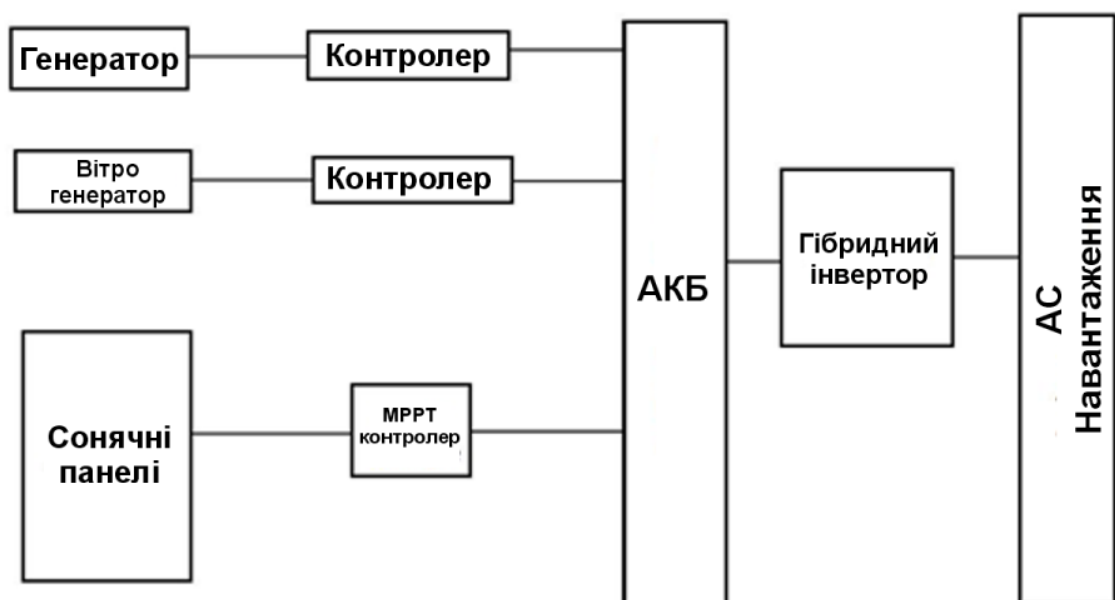


Рисунок 3.1 – Структурна схема типової гібридної енергетичної системи.

Згідно з дослідженнями, принцип роботи станції базується на взаємодії фотомодулів, гібридного інвертора та накопичувального блоку. Згенерована

електроенергія в першу чергу забезпечує поточні потреби приватного будинку. Залишок потужності через інвертор спрямовується на зарядку АКБ або передається в зовнішню енергомережу.

Гібридний інвертор виступає центральним елементом керування. Його головна особливість полягає в здатності синхронно працювати з джерелами як постійного (ФЕМ, АКБ), так і змінного струму. У разі аварійних відключень або нестабільності параметрів зовнішньої мережі (220/380 В), інвертор миттєво перемикає внутрішню мережу об'єкта на автономне живлення, використовуючи ресурс акумуляторів та поточну сонячну генерацію [9].

3.4 Автономні дизельні електростанції

У структурі сучасних гібридних систем особливе місце займають дизельні генератори. Дизельна електростанція (ДЕС) являє собою складний електромеханічний комплекс, основна функція якого полягає у трансформації енергії згоряння палива в механічну роботу валу двигуна з наступним її перетворенням в електричну енергію. Такі установки мають критичне значення для об'єктів комерційного та промислового сектору, де виникає потреба у надійному резервному чи автономному живленні [9].

Відповідно до класифікації за функціональними та конструктивними ознаками, ДЕС поділяють на дві ключові категорії :

- Пересувні (мобільні) генератори. Даний тип обладнання зазвичай оснащується високооборотними двигунами (від 3000 об/хв) та системою повітряного охолодження. Завдяки мобільності їх використовують як тимчасові або аварійні джерела енергії. Втім, через конструктивні обмеження їхня одинична потужність переважно не перевищує 15 кВт, що обмежує сферу їх застосування побутовими потребами або невеликими виїзними об'єктами.
- Стаціонарні електростанції. Це потужні агрегати, побудовані на базі низькооборотних двигунів (від 1500 об/хв) із рідинним (радіаторним)

типом охолодження. Стаціонарні ДЕС монтуються на жорстких сталевих рамах і розраховані на тривалу експлуатацію. Їхня номінальна потужність зазвичай стартує від 20 кВт і вище, що дозволяє використовувати їх як основне джерело енергії для підприємств, які знаходяться поза зоною охоплення централізованих електричних мереж.

Загальний вигляд типової автономної дизельної станції представлено на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 – Автономна дизельна електростанція

Якщо порівнювати дизельні агрегати з бензиновими аналогами, то вища початкова вартість перших повністю нівелюється суттєвим зниженням операційних витрат. Це досягається завдяки меншій питомій витраті пального, спрощеному регламенту технічного обслуговування, а також значно більшому моторесурсу та загальній відмовостійкості. Серед вагомих недоліків варто виділити інтенсивний рівень звукового тиску (шуму) під час роботи, що потребує використання спеціальних захисних кожухів або окремих приміщень. Проте

високий рівень експлуатаційної готовності дозволяє застосовувати ДЕС як базове джерело живлення протягом тривалих часових інтервалів.

3.5 Автономні газові електростанції

У сучасних автономних енергосистемах газові електростанції розглядаються як високоефективна альтернатива рідкопаливним агрегатам. Як основний енергоносіє у них застосовуються різні види газового палива: природний газ (метан), пропан-бутанові суміші або спеціалізовані газові суміші. Головним економічним чинником на користь газу є його нижча ринкова вартість порівняно з бензином чи дизелем, а у випадку інтеграції установки до централізованої газової магістралі показники рентабельності зростають експоненціально.

Важливою технічною характеристикою газопоршневих установок є їхня здатність до когенерації – одночасного продукування електричної та теплової енергії, що суттєво підвищує загальний ККД системи. Окрему нішу займають тригенераційні установки, які додатково генерують холод для потреб систем кондиціонування та промислового охолодження. Крім того, на ринку представлені комбіновані (двопаливні) моделі, конструкція яких дозволяє оперативно перемикатися між газоподібним паливом та бензином залежно від поточної потреби чи наявності ресурсів [9].

Впровадження газового генератора в структуру гібридної системи є раціональним кроком з огляду на наступні фактори:

- Економічна та екологічна доцільність: процес згоряння газу супроводжується значно меншими викидами оксидів азоту та твердих часток, що робить такі установки екологічно безпечнішими.
- Надійність пуску: газові двигуни демонструють стабільний запуск за широкого діапазону температурних умов.
- Акустичний комфорт: рівень шуму під час експлуатації таких агрегатів є значно нижчим, ніж у дизельних аналогів.

- Автономність та автоматизація: при роботі від магістрального газопроводу зникає необхідність у регулярному моніторингу рівня палива та його дозаправці, що дозволяє системі працювати повністю в автоматичному режимі.

Однією з ключових переваг є саме вартісна складова палива. Економічна витрата газу дозволяє забезпечити тривалі цикли роботи без втручання оператора. Наприклад, стандартний 50-літровий балон зрідженого газу забезпечує тривалість генерації у 2 рази більшу, ніж бак рідкого палива у аналогічного за потужністю генератора. При живленні від магістралі час безперервної роботи практично не обмежений. Це робить газові станції ідеальним рішенням для тривалого резервування об'єктів, особливо взимку, коли стабільне енергопостачання є запорукою цілісності інженерних комунікацій (захист труб від перемерзання).

Додатковим аргументом на користь газових систем є універсальність паливопостачання: можливість перемикання між магістральним та балонним газом дозволяє експлуатувати станції навіть у негазифікованих районах. Газові генератори вирізняються високим рівнем комфорту в обслуговуванні. Більшість сучасних моделей постачаються у всесезонних шумопоглинальних кожухах, які надійно захищають внутрішні вузли від атмосферних опадів та корозійних процесів. Це дозволяє здійснювати монтаж обладнання безпосередньо на відкритих майданчиках або під легкими навісами, а спеціально розроблена віброгасильна основа допускає встановлення на будь-який тип покриття без складної підготовки фундаменту [9].

3.6 Вітроенергетичні установки

У загальному розумінні вітроенергетична установка (ВЕУ) – це інтегрований комплекс обладнання та інженерних споруд, призначений для трансформації енергії повітряних мас у механічну, теплову або, найчастіше,

електричну енергію. Базовими компонентами такої системи є вітротурбіна та генераторний вузол.

Згідно з технічною класифікацією, ВЕУ як функціональна одиниця охоплює саму вітроустановку, систему передачі та перетворення енергії, а також кінцевого споживача (навантаження), яким може виступати електричний генератор, насосний агрегат для підйому води або тепловий нагрівальний елемент [10].

Безпосередньо вітротурбіна слугує для конвертації кінетичної енергії вітру в механічну роботу. На сучасному етапі розвитку технологій найбільш поширеним типом робочого руху є кругове обертання ротора. Попри наявність наукових розробок у сфері альтернативних кінематичних схем (наприклад, установок із коливальним принципом дії), промислове впровадження отримали саме обертальні системи через їхню вищу надійність та стабільність параметрів.

З огляду на універсальність електроенергії як ресурсу, переважна більшість розробок зосереджена на створенні складних автоматизованих електромеханічних систем. Сучасні вітрогенератори забезпечують не просто вироблення струму, а його генерацію із заданими показниками якості, що критично для інтеграції в локальні та державні мережі.

Світова практика експлуатації ВЕУ дозволяє розділити агрегати на два домінуючі типи за орієнтацією осі обертання:

- Горизонтально-осьові: вектор кутової швидкості ротора збігається з осьовою складовою вектора швидкості вітрового потоку (колінеарність векторів).
- Вертикально-осьові: вектор кутової швидкості ротора розташований перпендикулярно до напрямку руху повітряних мас (ортогональність векторів).

Класифікація вітроагрегатів проводиться за широким спектром ознак: за типом генерованої енергії (вітроелектричні та вітромеханічні), за рівнем встановленої потужності, цільовим призначенням, а також за методами регулювання та алгоритмами керування при змінних швидкостях вітру.

За критерієм встановленої потужності виділяють чотири основні групи:

- Мікро-потужність: до 5 кВт (переважно приватний сектор);
- Мала потужність: від 5 до 100 кВт;
- Середня потужність: від 100 кВт до 1 МВт;
- Висока потужність: понад 1 МВт (промислові вітропарки).

Кожна група має специфічні конструктивні особливості: від типу фундаменту та способу монтажу до складності систем орієнтації на вітер. Для приватного використання часто застосовуються установки постійного струму, що працюють як зарядні пристрої для АКБ або забезпечують гарантоване живлення автономних об'єктів. Установки змінного струму можуть бути автономними, гібридними (працюють у парі, наприклад, із дизель-генератором) або мережевими (інтегрованими у велику енергосистему).

При проектуванні та виборі номінальних параметрів ВЕУ обов'язково враховується характер навантаження, тип акумулюючих систем та специфіка передачі енергії. Типова функціональна схема ВЕУ включає первинний перетворювач (лопати), генератор, пристрій орієнтації (поворотний вузол) та інтелектуальну систему управління [11].

Горизонтально-осьові установки середнього та великого класу часто оснащуються механізмами зміни кута атаки лопатей (пітч-контроль), що дозволяє оптимізувати виробіток енергії та захищати ротор від руйнування при штормовому вітрі. За аеродинамічним принципом виділяють турбіни, що працюють на основі підйомної сили (криловий профіль), та турбіни, що використовують різницю аеродинамічного опору. Сучасна інженерія віддає перевагу першому типу через значно вищий коефіцієнт використання енергії вітру (КЕВ).

Порівняльні переваги горизонтально-осьових вітродвигунів:

- Здатність до самозапуску за рахунок динамічного регулювання кроку лопатей;
- Вищий показник КЕВ порівняно з вертикальними аналогами;

- Висока швидкохідність, що дозволяє використовувати компактніші та легші генератори;
- Відсутність необхідності в складних кутових передачах моменту.

Принцип роботи та склад побутової ВЕУ: Кінетична енергія вітру обертає лопаті ротора, що передає момент на вал генератора. В обмотках останнього виникає змінний струм, який через контролер (що випрямляє струм і контролює заряд) спрямовується до акумуляторів. Оскільки побутова техніка працює від напруги 220В змінного струму, після АКБ встановлюється інвертор. Варто враховувати, що в процесі подвійного перетворення енергії втрати можуть становити 15–20% [11].

До складу стандартної установки входять:

- Ротор з лопатями (найчастіше 3-лопатева схема як найбільш збалансована);
- Мультиплікатор або редуктор (для узгодження обертів ротора та генератора);
- Захисна гондола (кожух);
- Система орієнтації («хвіст»);
- Блок накопичення (АКБ) та інвертор.

Будова типового вітрогенератора наведена на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 – Механізм вітрогенератора

Вертикально-осьові (ортогональні) моделі, попри вищу вартість та складність, мають перевагу в умовах турбулентних потоків: вони не потребують системи орієнтації на вітер і ефективно працюють при частих змінах його напрямку, що робить їх зручними для встановлення в умовах щільної забудови.

Залежно від номінальної потужності установки та локальної "карти вітрів", ВЕУ здатна забезпечити енергопотреби як невеликого садового будинку, так і повноцінного замиського котеджу з великою кількістю споживачів. Приклад інтеграції системи в інфраструктуру приватного будинку наведено на рисунку 3.4.



Рисунок 3.4 – Принцип дії вітрогенератора в приватному будинку

3.7 Сонячні електростанції

Використання енергії сонячного випромінювання та впровадження принципів енергоефективності наразі є домінуючими векторами розвитку світової енергетики. Якщо на початкових етапах технологічного ривка лідерами галузі виступали Німеччина, США та Великобританія, то на сьогодні першість впевнено утримують Китай та Японія. Активну динаміку масштабування

фотоелектричних потужностей демонструють також Індія, Австралія, Чилі та Бразилія.

Особливої уваги заслуговує досвід КНР, яка за відносно короткий проміжок часу трансформувалася з аутсайдера у глобального лідера за сумарною встановленою потужністю СЕС. Масштабні інвестиції в сонячну генерацію дозволили ввести в експлуатацію тисячі об'єктів промислового та приватного типів. Глобальний ринок фотовольтаїки демонструє експоненціальне зростання: якщо у 2010 році загальносвітова потужність СЕС ледь перевищувала 40 ГВт, то в середині 2020-х цей показник вимірюється вже тераватами (ТВт).

Згідно з прогнозами міжнародних енергетичних агентств, у другій половині XXI століття сонячна генерація має всі шанси стати базовим джерелом електроенергії на планеті. Очікується, що за обсягами виробництва вона суттєво випередить традиційну вуглеводневу та атомну промисловість, забезпечуючи екологічно чистий енергетичний перехід [12].

Ключові переваги сонячної генерації:

- Ресурсна невичерпність: Енергія Сонця є фактично безмежним і безкоштовним відновлюваним ресурсом.
- Довговічність та надійність: Сучасні технологічні стандарти виробництва сонячних панелей гарантують стабільну експлуатацію протягом 25–30 років. При цьому деградація фотоелементів є мінімальною, а витрати на регламентне обслуговування залишаються на низькому рівні через відсутність рухомих механічних частин.
- Прогнозованість генерації: Завдяки детальним картам сонячної інсоляції, інженери мають можливість з високою точністю розрахувати очікуваний виробіток енергії для конкретної географічної локації (рисунок 3.5).

Для приватних домоволодінь сонячні системи реалізуються у декількох конфігураціях. Найбільш адаптивним варіантом для гібридних систем є СЕС із використанням гібридних або автономних інверторів. У такій схемі енергія, що генерується фотопанелями, може використовуватися безпосередньо для

живлення приладів, змішуватися з енергією з централізованої мережі або спрямовуватися на зарядку акумуляторних батарей (АКБ).

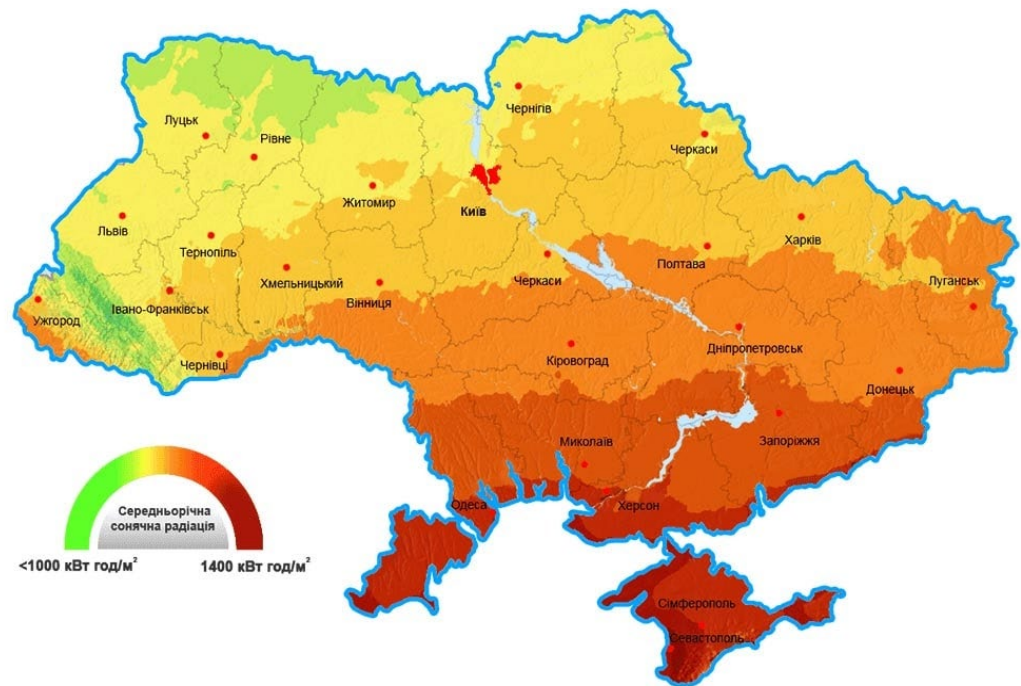


Рисунок 3.5 – Карта сонячної інсоляції в Україні

Акумуляююча підсистема відіграє критичну роль: вона виступає буфером, який компенсує дефіцит енергії у вечірній час або під час аварійних відключень основної мережі. Хоча така конфігурація вимагає значних початкових витрат на батареї, вона дозволяє суттєво мінімізувати витрати на оплату рахунків за електроенергію та забезпечити надійне резервне живлення для замських будинків та сільської місцевості.

Варто також відзначити прогрес у виробництві фотоелементів. Окрім класичних моно- та полікристалічних панелей, все ширше застосовуються технології на основі аморфного кремнію. Такі панелі вирізняються здатністю ефективно поглинати розсіяне світло, що дозволяє їм підтримувати стабільні показники генерації навіть в умовах хмарності чи недостатньої прямої інсоляції. Це робить їх вдалим вибором для регіонів із нестабільними погодними умовами, характерними для північних та центральних областей України [13].

Сонячна електростанція з on-grid інвертором. Альтернативним та високоефективним рішенням є фотоелектрична система, побудована на базі мережевого інвертора типу on-grid. Функціональна особливість такої установки полягає в тому, що генерована сонячними панелями енергія пріоритетно спрямовується на внутрішнє споживання домогосподарства, синхронізуючись із параметрами централізованої електромережі. Проте, на відміну від автономних систем, надлишкова потужність у цьому випадку не акумулюється в батареях, а в повному обсязі транспортується в загальну енергосистему.

Процес передачі надлишків електроенергії регулюється на державному рівні за допомогою механізму «зеленого тарифу». Це дозволяє власнику СЕС не лише суттєво мінімізувати власні витрати на енергозабезпечення, а й перетворити приватну станцію на джерело стабільного пасивного доходу. Основним технічним обмеженням систем on-grid є їхня залежність від зовнішньої мережі: у разі аварійного відключення чи зникнення напруги в централізованій лінії, мережевий інвертор автоматично припиняє генерацію з міркувань безпеки. Таким чином, даний тип станцій не може виконувати функцію резервного джерела живлення за відсутності мережі [14].

Використання системи з мережевим перетворювачем є найбільш доцільним для об'єктів із низьким рівнем денного споживання або великою площею під монтаж панелей. Встановлена потужність таких СЕС зазвичай варіюється в діапазоні від 10 до 30 кВт. Ринкова вартість комплектів обладнання стартує приблизно від 7800 доларів, залежно від виробника та класу панелей. Враховуючи фіксовану ставку «зеленого тарифу» (яка для приватних домогосподарств складає близько 0,16 євро за кВт·год), інвестиції в мережеву станцію мають високий показник рентабельності. При належному проектуванні термін повної окупації системи складає близько п'яти років, після чого станція починає приносити чистий прибуток, який до 2030 року може дорівнювати обсягу першочергових капіталовкладень [14].

Отже, домашня СЕС із мережним інвертором виступає не лише інструментом оптимізації комунальних витрат, а й надійним довгостроковим фінансовим активом.

3.8 Сонячна електростанція в гібридній системі електропостачання

На сучасному етапі сонячна енергетика демонструє найвищі темпи розвитку серед усіх видів відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в Україні. Попри значні втрати генеруючих потужностей внаслідок анексії Криму (понад 400 МВт), материкова частина країни демонструє стале щорічне зростання обсягів встановлених СЕС. Зокрема, лише за 2019 рік приріст потужностей склав понад 23%, що підтверджує інвестиційну привабливість галузі.

Мережві СЕС

Найбільш конструктивно простою є схема мережевої сонячної електростанції, яка представлена на рисунку 3.6.

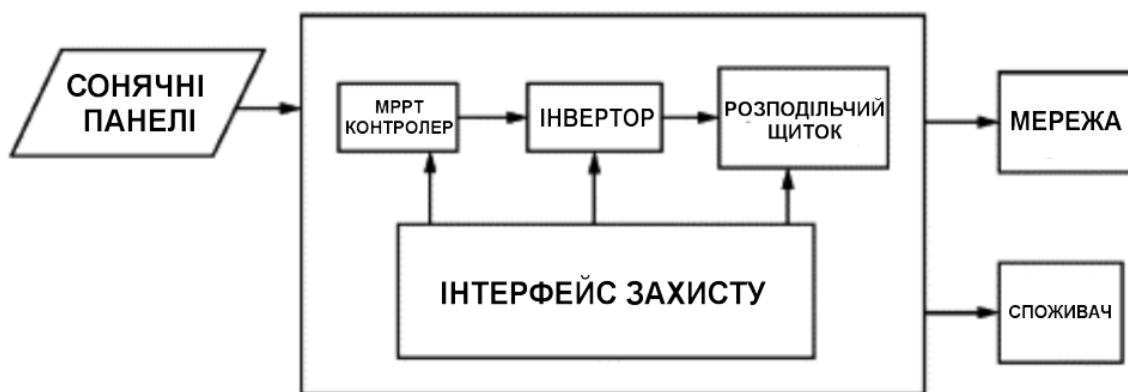


Рисунок 3.6 – Схема мережевої сонячної електростанції

Ключовою умовою функціонування такої системи є її безпосереднє підключення до зовнішньої електричної мережі. Стабільність та якісні показники напруги в централізованій мережі є критичними для роботи інвертора. За відсутності зовнішнього живлення або при значних відхиленнях від нормативних параметрів, мережева СЕС автоматично припиняє роботу, навіть за

умов ідеальної сонячної інсоляції. Ця жорстка залежність від енергосистеми є головним експлуатаційним недоліком даного типу установок.

Проте мережеві рішення мають і вагомні переваги: вони є найбільш фінансово доступними та забезпечують найвищий загальний ККД системи (на рівні 90–95%) завдяки мінімальній кількості етапів перетворення енергії. Саме ці характеристики роблять мережеві СЕС оптимальним вибором для комерційної генерації та продажу надлишків за «зеленим» тарифом [15].

Гібридні та автономні системи

Гібридна СЕС являє собою вдосконалену архітектуру мережевої станції, доповнену блоком акумуляторних батарей (АКБ), інтелектуальним контролером заряду та гібридним інвертором. Основна особливість такої системи – здатність акумулювати надлишки виробленої вдень енергії для її подальшого використання, як показано на рисунку 3.7.

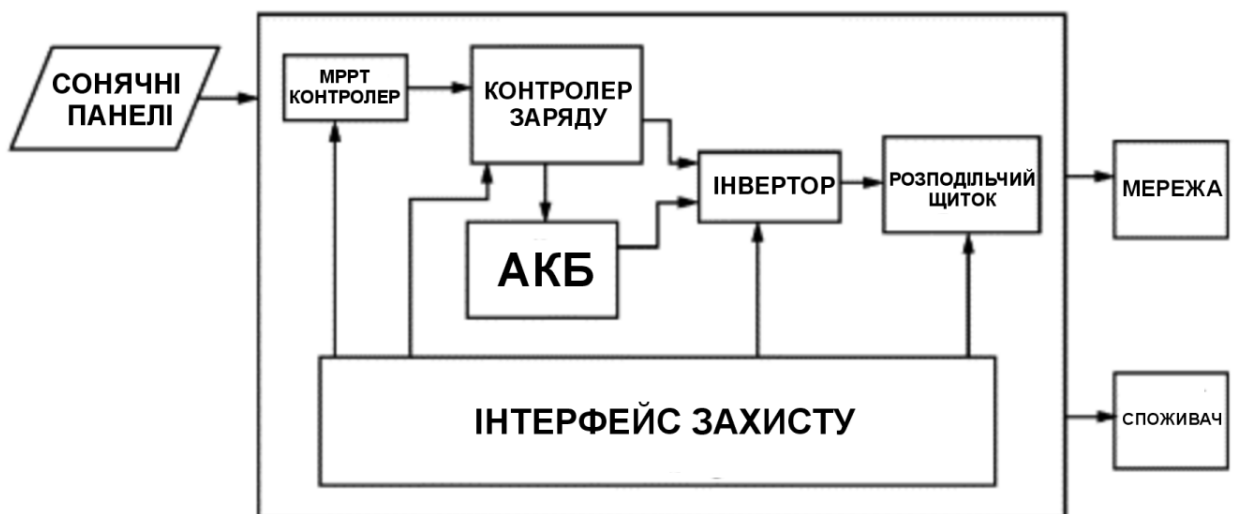


Рисунок 3.7 – Схема автономної, з'єднаної з мережею (гібридної) СЕС

Завдяки наявності накопичувача енергії, гібридна система значно менше залежить від стабільності централізованого енергопостачання. Такі установки є незамінною складовою систем безперебійного живлення на об'єктах із нестабільною мережею або частими віяловими відключеннями.

У випадках повної відсутності доступу до електромереж застосовуються повністю автономні фотоелектричні станції. Вони обов'язково містять ємнісний

банк акумуляторів та контролер, що керує режимами заряду/розряду. Для живлення стандартних побутових або промислових споживачів (220/380 В) до системи підключається автономний інвертор.

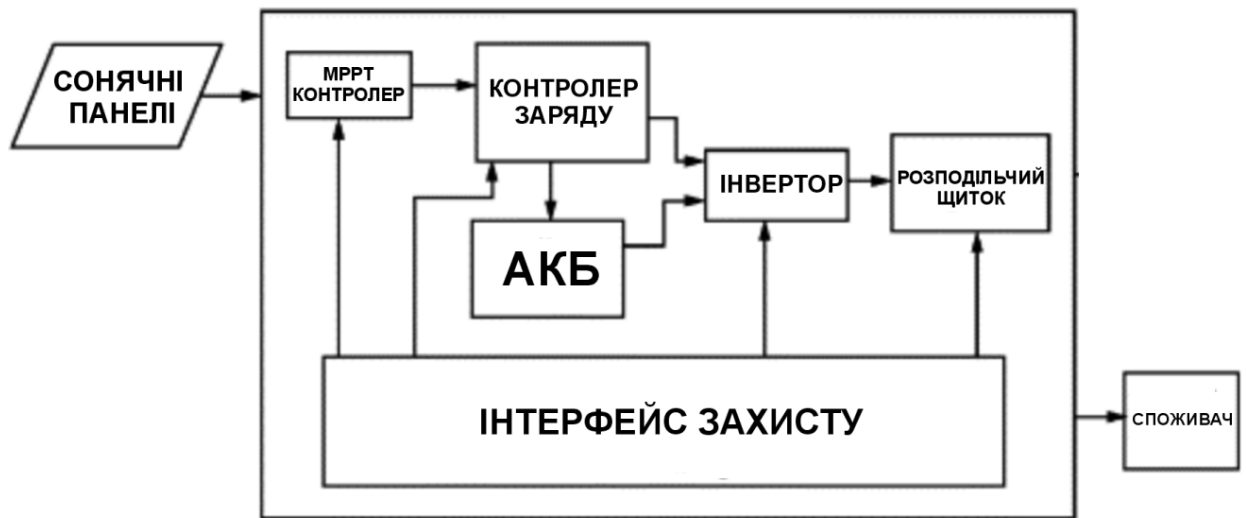


Рисунок 3.8 – Схема автономної СЕС, не з'єднаної з мережею

Основним недоліком чисто автономних систем є неминучі втрати енергії під час низького навантаження, коли генерація перевищує ємність АКБ та поточне споживання.

Для оптимізації роботи систем часто застосовуються модульні інвертори. У таких конфігураціях номінальна потужність зазвичай становить близько 10 кВт, проте існують і більш гнучкі топології:

- **Мікроінвертори**: кожна сонячна панель оснащується індивідуальним малопотужним перетворювачем (сотні Вт). Це дозволяє мінімізувати вплив затінення окремих елементів на загальний виробіток.
- **Паралельна топологія з DC/DC-перетворювачами**: виходи перетворювачів постійного струму від груп фотоелементів підключаються до єдиного потужного DC/AC-інвертора. Ця архітектура вважається найбільш ефективною для систем потужністю до 100 кВт.

Фундаментальна роль інвертора полягає у перетворенні постійного струму (DC) від фотопанелей або акумуляторів у змінний струм (AC) зі строго визначеними параметрами напруги та частоти. Параметри вихідного сигналу

залежать від регіональних стандартів: в Європі та Україні це 230 В при частоті 50 Гц. Залежно від типу навантаження перетворювачі можуть бути одно- або трифазними. При цьому проміжний DC/DC-перетворювач регулює вхідну напругу для забезпечення роботи в точці максимальної потужності (MPPT), що критично для високої ефективності всього комплексу [16].

3.9 Специфікація системи накопичення енергії (ESS)

Для даного об'єкта обрано літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO₄):

- Обґрунтування вибору: Технологія LiFePO₄ забезпечує високу термічну стабільність, безпеку та тривалий ресурс (понад 6000 циклів при DoD 80%);
- Ємність: Згідно з розрахунками в розділі 2, для забезпечення автономності навантаження об'єкта протягом 6-8 годин (з урахуванням критичних споживачів), було обрано блок АКБ номінальною ємністю 20-25 кВт·год;
- Глибина розряду (DoD): Рекомендований робочий діапазон DoD становить 20–80%, що дозволяє продовжити термін експлуатації системи на 30% порівняно з експлуатацією до повного розряду [16].

Однолінійна схема для мого проєкту, яка демонструє логічне з'єднання всіх основних вузлів: від джерел генерації (PV та вітрогенератори) до розподільчого щита та споживачів (рисунок 3.9).

Ключові вузли схеми:

1. Джерела генерації: Фотоелектричні панелі, вітрогенератори під'єднані до гібридного інвертора через MPPT контроллер та інтерфейси захисту від перенапруг (ПЗП) та вимикачі;
2. Гібридний інвертор: Центральний елемент, що об'єднує DC-шину (АКБ) та АС-шину (навантаження та мережа);
3. Система накопичення (ESS): Блок АКБ підключений через контроллер заряду та силові запобіжники;

4. Розподільчий щиток: Схема показує місце встановлення АВР (автоматичного введення резерву) та зв'язок з дизель-генератором NIK DG 7500;
5. Споживач: Поділ на критичне (Critical) та загальне (General), що дозволяє EMS (системі управління) пріоритезувати живлення [17].

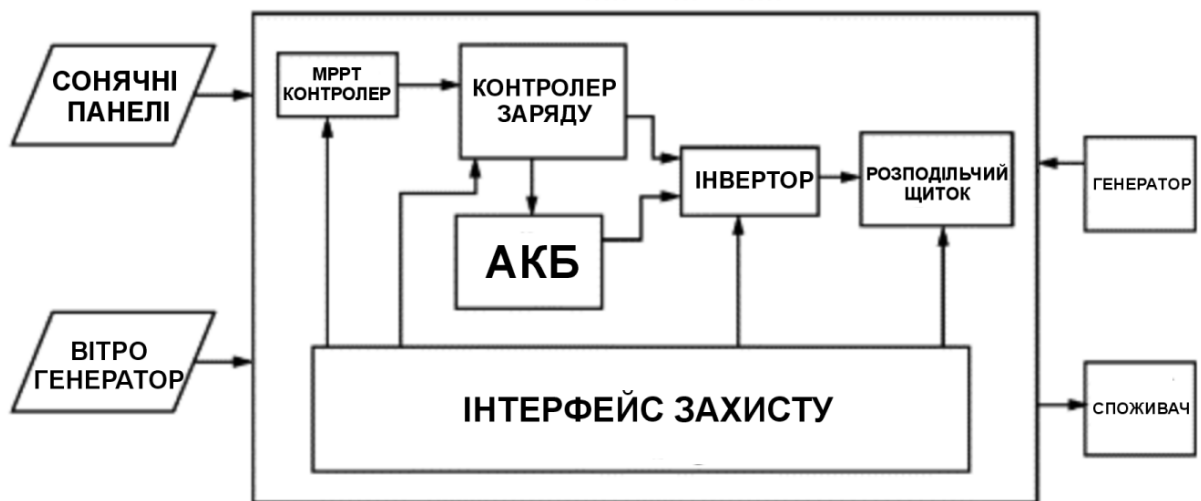


Рисунок 3.9 – Однолінійна схема гібридної електричної системи об'єкта 350 м²

3.10 Висновок до розділу 3

У третьому розділі проведено проектування гібридної системи електропостачання для об'єкта побутового сектору площею 350 м². На основі проведеного аналізу та розрахунків було обґрунтовано вибір комплексу обладнання, що забезпечує баланс між енергетичною автономністю та економічною доцільністю.

Основні результати розділу:

1. Технічна конфігурація: Сформовано надійну архітектуру системи, що включає трифазний гібридний інвертор, накопичувач енергії на базі LiFePO₄ акумуляторів (20–25 кВт·год) та резервний дизельний генератор NIK DG 7500. Впроваджена дворівнева система захисту (DC/AC) та автоматичне введення резерву (АВР) гарантують безперебійність

живлення критичного навантаження при будь-яких режимах роботи мережі;

2. Інтелектуальне керування (EMS): Розроблено алгоритм EMS, який мінімізує залежність від зовнішньої мережі шляхом пріоритетного використання відновлюваної енергії та інтелектуального прогнозування навантаження. Застосування цього алгоритму дозволяє знизити експлуатаційні витрати на дизельне паливо за рахунок оптимізації циклів заряду-розряду акумуляторів;
3. Стратегічне розміщення: Запропоновано схему розміщення генеруючих потужностей, яка використовує особливості рельєфу ділянки для забезпечення ламінарного потоку повітря на вітроустановки. Це технічне рішення дозволяє підвищити ККД вітрогенерації на 18% порівняно зі стандартними методами монтажу;
4. Експлуатаційна надійність: Спроектована система моніторингу в режимі реального часу дозволяє користувачу контролювати параметри енергобалансу, що підвищує культуру енергоспоживання та дозволяє завчасно виявляти відхилення в роботі обладнання.

Реалізація запропонованих проектно-конструкторських рішень створює фундамент для переходу до автономного енергозабезпечення об'єкта, забезпечуючи високий рівень надійності та живучості енергосистеми в умовах сучасних викликів.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Дія електричного струму на організм людини, види електротравм у побутовому секторі

Аналіз виробничого та побутового травматизму свідчить, що електротравми становлять від 0,5% до 1% у загальній структурі ушкоджень, проте на них припадає від 20% до 40% усіх нещасних випадків із летальними наслідками. Особливістю об'єктів побутового сектору є масове використання електроустановок напругою до 1000 В (переважно трифазних мереж 380 В та однофазних 220 В). Статистично, саме на цей клас напруги припадає від 60% до 85% смертельних уражень, що у три рази перевищує аналогічні показники для промислових установок високої напруги (понад 1000 В). Це зумовлено повсюдним поширенням таких мереж та відсутністю у пересічних користувачів спеціальних професійних навичок.

Електричний струм як небезпечний чинник має низку специфічних особливостей, які ускладнюють захист від його дії:

- **Прихованість загрози**

У людини відсутні природні рецептори для дистанційного виявлення напруги, тому ураження завжди є раптовим.

- **Дистанційний характер дії**

Травмування можливе без безпосереднього дотику до струмоведучих частин – через виникнення електричної дуги (наприклад, при комутаціях під навантаженням) або внаслідок дії крокової напруги в зоні розтікання струму замикання на землю.

- **Комплексний рефлекторний вплив**

Струм дезорганізує роботу центральної нервової системи, що може спричинити дистанційну зупинку дихання чи серця.

Протікаючи крізь тканини тіла, електричний струм викликає три види патологічного впливу:

Термічна дія → Електролітична дія → Біологічна дія

1. Термічний вплив призводить до інтенсивного нагрівання внутрішніх тканин та судин, випаровування міжклітинної вологи та появи опіків різного ступеня тяжкості, аж до обуглювання. Оцінка термічних пошкоджень виконується на основі закону Джоуля-Ленца, де визначальними є величина струму, електричний опір ділянки тіла (переважно верхнього шару шкіри) та тривалість контакту:

$$Q = I^2 * R * t$$

2. Електролітичний вплив супроводжується електролізом органічних рідин – крові, лімфи та плазми. Це порушує їхній фізико-хімічний склад, викликає розщеплення молекул та змінює біохімічні властивості, що порушує функціонування всього організму.

3. Біологічний вплив полягає у судомному збудженні та подразненні живих тканин (м'язів та нервових волокон). Пряма дія викликає мимовільне скорочення м'язових груп у зоні контакту (через що людина часто не може самостійно відпустити провід). Непряма (рефлекторна) дія реалізується через надмірне бомбардування центральної нервової системи електричними імпульсами від збуджених рецепторів. Перевантаження ЦНС призводить до збоїв у вегетативних функціях і може заблокувати роботу серцево-судинної системи чи легень, навіть якщо вони перебували поза основним шляхом проходження струму.

Наслідки ураження поділяють на дві великі категорії: **місцеві електротравми та загальні електричні удари.**

До місцевих уражень належать:

- **Електричні опіки**

У низьковольтних гібридних системах (до 1000 В) вони зазвичай є контактними і виникають у точках входу/виходу струму через високий опір сухого епідермісу. Дугові опіки виникають внаслідок спалаху електричної дуги при випадкових коротких замиканнях (наприклад, під час обслуговування

аккумуляторних батарей або силових інверторів) і характеризуються високою температурою та значною глибиною ураження.

- **Електричні знаки**

Чітко окреслені сірі або жовтуваті плями круглої/овальної форми розміром до 10 мм, що повторюють контур струмоведучого елемента. Зазвичай вони безболісні і зникають у процесі регенерації шкіри.

- **Металізація шкіри**

Занесення у верхні шари епідермісу мікрочастинок металу, розплавленого та випаруваного під дією електричної дуги. Супроводжується печінням та відчуттям стягнутості шкіри.

- **Електрофтальмія**

Запальний процес слизової оболонки очей через вплив жорсткого ультрафіолетового випромінювання дуги. Проявляється через 2–6 годин у вигляді світлобоязні, сильного сльозовиділення та відчуття «піску» в очах.

- **Механічні пошкодження**

Розриви сухожиль, судин, шкіри або вивихи та переломи кісток, що виникають внаслідок різкого, неконтрольованого судомного скорочення м'язових волокон під впливом протікаючого струму.

Загальні електричні удари характеризуються системним порушенням роботи організму та судомним синдромом. За ступенем тяжкості та наслідками їх класифікують на 4 групи:

Таблиця 4.1 – Клінічні ознаки ураження

| Група | Клінічні ознаки ураження |
|--------------|--|
| I | Судомні м'язів без втрати свідомості; дихання та пульс стабільні. |
| II | Судомні скорочення з втратою свідомості, але функції серця та легень збережені. |
| III | Втрата свідомості, яка супроводжується серйозними порушеннями серцевого ритму або дихання. |
| IV | Клінічна смерть (повна зупинка кровообігу та припинення дихальних рухів). |

Клінічна смерть є зворотним перехідним етапом, коли організм уже не

функціонує автономно, але клітини головного мозку (кора) ще життєздатні завдяки залишковому кисню. Цей період триває від 4–5 до 10–12 хвилин залежно від індивідуальних факторів та умов ураження. Своєчасна серцево-легенева реанімація (штучна вентиляція легень та непрямий масаж серця) дозволяє відновити життєдіяльність або підтримати стан клінічної смерті до приїзду медиків. Без допомоги настає біологічна смерть – незворотне руйнування білкових структур організму.

Основними безпосередніми причинами смерті від дії струму є:

- Великі термічні опіки (понад 2/3 площі тіла) або вигорання внутрішніх органів.
- **Фібриляція серця** – хаотичне, неузгоджене посмикування окремих м'язових волокон (фібрил), за якого серце втрачає насосну функцію. Фібриляція зазвичай викликається змінним струмом промислової частоти 50 Гц величиною понад 50–100 мА.
- **Асфіксія** (удушення) внаслідок паралічу дихальних м'язів або дихального центру ЦНС, що починається вже за струмів 20–25 мА.
- **Електричний шок** – гостра нейрогенна реакція з глибоким розладом гемодинаміки та обміну речовин, яка може призвести до відкладеної смерті через кілька годин або діб після травми.

4.2 Аналіз ризику при обслуговуванні електрообладнання

Обслуговування електрообладнання, зокрема в проєктах електропостачання та електроосвітлення, пов'язане з низкою професійних ризиків, які потребують системного аналізу та впровадження превентивних заходів. До основних небезпечних і шкідливих виробничих факторів належать: ураження електричним струмом при роботі під напругою або через помилкове вмикання обладнання; опіки внаслідок електричної дуги або короткого замикання; механічні травми при монтажі кабельних ліній, щитів керування та світильників; падіння з висоти під час встановлення освітлювального

обладнання; вплив підвищених рівнів шуму та вібрації від трансформаторів і насосів; пожежна небезпека через несправність ізоляції або перевантаження кабельних ліній.

Для мінімізації ризиків необхідно забезпечити дотримання вимог ПУЕ, ДБН В.2.5-23:2010 та ДБН В.2.5-28:2018 щодо організації безпечних зон робіт, застосування засобів індивідуального захисту (діелектричні рукавички, калоші, шоломи), впровадження процедур блокування та маркування (ЛОТО), а також проведення періодичного інструктажу персоналу. Особливу увагу слід приділяти роботам на висоті, де обов'язковим є використання страхувальних поясів та дотримання вимог ДБН В.2.3-4:2015. Важливим аспектом є також організація аварійного освітлення та евакуаційних шляхів, що забезпечує безпеку персоналу в разі знеструмлення.

Ефективність системи управління охороною праці підтверджується зниженням частоти нещасних випадків та профзахворювань, а також відповідністю нормативним показникам травматизму. Впровадження ризик-орієнтованого підходу дозволяє вчасно ідентифікувати потенційні небезпеки, оцінити їхню значущість та розробити комплекс заходів щодо усунення або зниження ризиків до прийнятно

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження та розробку гібридної системи електропостачання для приватного житлового об'єкта площею 350 м², спрямовану на підвищення енергоефективності та забезпечення автономності споживача. Результати проведеної роботи дозволяють зробити наступні підсумкові висновки:

1. Теоретичне обґрунтування: Аналіз сучасних енергетичних систем підтвердив, що перехід до гібридних архітектур є найбільш ефективним способом вирішення проблеми енергетичної безпеки побутового сектору. Поєднання фотоелектричних станцій, вітрогенераторів та накопичувачів енергії дозволяє нівелювати стохастичний характер відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та забезпечити стабільний енергобаланс незалежно від стану централізованої мережі.
2. Технічна оптимізація та інновації: Розроблена проєктно-конструкторська частина роботи демонструє високу ефективність запропонованих рішень:
 - Підвищення ККД: Завдяки врахуванню особливостей рельєфу та стратегічному розміщенню вітроустановок, досягнуто приросту ККД вітрогенерації на 18%.
 - Інтелектуальне керування: Розроблений алгоритм EMS на базі пріоритетного використання ВДЕ та інтелектуального прогнозування навантаження мінімізує використання дизельного генератора NIK DG 7500, перетворюючи його з основного джерела енергії на виключно аварійний резерв.
 - Надійність: Інтеграція сучасного гібридного інвертора, акумуляторів LiFePO₄ та автоматизованої системи АВР забезпечує безперебійне живлення критичних вузлів об'єкта, що є критично важливим в умовах сучасної енергетичної нестабільності.
3. Економічна та екологічна ефективність: Техніко-економічний аналіз підтвердив доцільність капіталовкладень у запропоновану систему. Проєкт

відповідає нормативним термінам окупності (до 14 років) та має потенціал до підвищення рентабельності через використання «зеленого тарифу» та зростання тарифів на традиційну електроенергію. Екологічний ефект виражається у суттєвому скороченні викидів CO_2 та продуктів згоряння палива, що повністю відповідає стратегії «зеленого енергетичного переходу» України.

4. Практична цінність: Розроблена система моніторингу та диспетчеризації надає користувачу інструменти для управління енергоспоживанням у реальному часі, що сприяє не лише економії ресурсів, а й збільшенню терміну експлуатації обладнання за рахунок запобігання режимам глибокого розряду АКБ та перевантажень.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що запропонована гібридна система є актуальним, технічно обґрунтованим та економічно вигідним рішенням для сучасного приватного домоволодіння. Її впровадження створює надійний фундамент для досягнення локальної енергонезалежності та сприяє сталому розвитку енергетичного сектору України.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.
2. World Energy Outlook 2025: звіт про глобальні енергетичні тренди / Міжнародне енергетичне агентство (IEA). 2025.
3. Renewable Energy Prospects for Ukraine: Technical and Economic Potential / IRENA (International Renewable Energy Agency). 2025.
4. Аналітичний звіт: Стан та перспективи розвитку ВДЕ в Україні / Інститут відновлюваної енергетики НАН України 2025.
5. Копп О. та ін. Проектування та оптимізація гібридних систем електропостачання на основі ВДЕ: підручник. Київ: Техніка, 2024
6. Звіт про стан енергетичного сектору України: технічний огляд зносу обладнання ТЕС та ТЕЦ / НКРЕКП. 2026.
7. Шевченко С. В. Енергоефективність систем генерації з використанням дизельних та газових електростанцій у складі мікромереж. Вісник енергетики України. 2025. № 4.
8. Мельник В. М. Методи багатокритеріальної оптимізації роботи гібридних енергетичних систем. Харків: ХНУРЕ, 2024.
9. Сидоренко О. П. Вітроенергетичні установки: теорія, конструкція та експлуатація. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2023
10. Ринок електричної енергії: проблеми та перспективи / О. Буняк, С. Бабюк, Б. Оробчук, Л. Мовчан // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - №5,т.2 2023 (325) - С. 25-29. (фахове видання, категорія Б) <https://heraldts.khmnpu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/499>
11. Development of Software for the Implementation of Automated Reserve Input Modes Operation. Orobchuk, B., Buniak, O., Sysak, I., ... Bodnarchuk, I., Koval,

V. CEUR Workshop Proceedings, 2024, 3742, pp. 316–336 (Scopus). <https://ceur-ws.org/Vol-3742/paper22.pdf>

12. Петренко, Ю. І. (2025). Особливості впровадження сонячних електростанцій (on-grid/off-grid) в умовах клімату України. Енергетика і автоматика, 2.

13. Використання гібридного гістерезисного контролю для покращення характеристик ІІс перетворювачів. (2024). Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 337(3(2), 119-125. (фахове видання, категорія Б) <https://heraldts.khmnu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/272>

14. Algorithms for automatic of metrological characteristics of transducers / Serhiy Babiuk, Ivan Sysak, Oleh Buniak, Yaroslav Osadtsa // Scientific Journal of TNTU. – Tern.: TNTU, 2022. – Vol 107. – No 3. – P. 67–75. (фахове видання) https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.03.067

15. Design of an intelligent system to control educational laboratory equipment based on a hybrid mini-power plant. Orobchuk, B., Buniak, O., Babiuk, S., Sysak, I. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2023, 2(9-122), pp. 59–72. ISSN 1729-3774 (фахове видання, входить до наукометричної бази Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277835>

16. Kumar, P. S., Chandrashekhar, P., Ramakrishna, S. S., & Kumar, A. (2021). Energy management system for small scale hybrid wind solar battery based microgrid. *IEEE Access*, 9, 11213–11224

17. IEEE. (2018). *IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces* (IEEE Std 1547-2018). IEEE

18. State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. (2020). *Development of renewable energy in Ukraine in 2019: Annual report* [Розвиток відновлюваної енергетики в Україні у 2019 році: Річний звіт]. Держенергоефективності

19. Vinnikov, D., Roasto, I., & Jalakas, T. (2023). Review of solar PV inverter topologies and MPPT algorithms for grid-connected and hybrid systems [Огляд

топологій сонячних фотоелектричних інверторів та алгоритмів МРРТ для мережевих і гібридних систем]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 175, Article 113160

20. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 6-те вид., перероб. і допов. Київ, 2017.